

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE
ARROZ IRRIGADO EM CENÁRIO FUTURO NO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

TESE DE DOUTORADO

Lidiane Cristine Walter

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ
IRRIGADO EM CENÁRIO FUTURO NO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Lidiane Cristine Walter

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Walter, Lidiane Cristine
Simulação da produtividade de grãos de arroz irrigado
em cenário futuro no Estado do Rio Grande do Sul /
Lidiane Cristine Walter.-2014.
84 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2014

1. Modelagem matemática 2. Aquecimento global 3.
Oryza sativa I. Streck, Nereu Augusto II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Lidiane Cristine Walter. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: lidianewalter@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

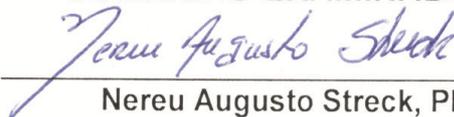
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ IRRIGADO
EM CENÁRIO FUTURO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por
Lidiane Cristine Walter

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

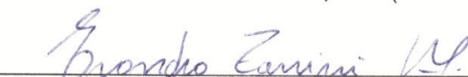
COMISSÃO EXAMINADORA:



Nereu Augusto Streck, PhD.
(Presidente/Orientador)



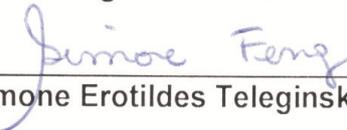
Cleber Maus Alberto, Dr. (UNIPAMPA)



Evandro Zanini Righi, Dr. (UFSM)



Santiago Vianna Cuadra, Dr. (EMBRAPA)



Simone Erotildes Teleginski Ferraz, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2014.

*Aos meus eternos professores, Sandra e Roque
Walter. E aos meus amores, Lucas e Hamilton.
Dedico...*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me guia pelo caminho certo, me dá força e perseverança para seguir.

Agradeço ao meu noivo, Hamilton Telles Rosa, que também é meu grande companheiro e parceiro de trabalho, pelo incentivo, dedicação e amor sem medida.

Ao Lucas, meu filho querido, que veio para renovar minha vontade de prosperar e ser melhor sempre.

Aos meus pais Sandra Walter e Roque Aloysio Walter, os maiores merecedores de toda recompensa, por todo o amor, pelo esforço dedicado à minha educação e por estarem sempre ao meu lado.

A toda minha família pelo carinho e pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus pais do coração, Ione e Airton Rosa, por seu entusiasmo.

Ao Professor Nereu Augusto Streck, pelos ensinamentos e dedicação.

Aos colegas e amigos do grupo de Agrometeorologia da UFSM, que foram colaboradores essenciais na execução deste trabalho de tese.

À equipe do SimulArroz (www.ufsm.br/simularroz) pelo comprometimento com o trabalho desenvolvido.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade.

A CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Instituto Federal Farroupilha pelo apoio à conclusão deste processo de qualificação.

“Agir, eis a inteligência verdadeira.

Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for.

O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito.

Condições de palácio têm qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?”

(Fernando Pessoa)

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ IRRIGADO EM CENÁRIO FUTURO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: LIDIANE CRISTINE WALTER

ORIENTADOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2014.

Projeções sobre possíveis mudanças climáticas indicam que a atual concentração de CO₂ deverá dobrar e a temperatura do ar aumentar em até 6 °C até o final deste século, proporcionando alterações na produtividade das culturas agrícolas. O impacto da mudança climática na cultura do arroz irrigado nas condições do Sul do Brasil deverá ser positivo, com aumento na produtividade potencial de grãos. No entanto, ainda há poucos estudos para avaliação do impacto da mudança climática no Rio Grande do Sul, estado com importante participação na produção de arroz do país. Assim, este trabalho teve como objetivo simular o impacto da mudança climática na produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, em um cenário de mudança climática baseado no cenário A1B do IPCC. A produtividade de grãos foi simulada com o modelo SimulArroz para três grupos de maturação (precoce, médio, tardio), sete datas de semeadura (01/08, 01/09, 01/10, 01/11, 01/12, 01/01, 01/02) em diferentes níveis de manejo da lavoura (níveis tecnológicos) nas seis regiões orizícolas do estado. Os resultados indicam que a mudança climática prevista no cenário A1B terá efeito positivo na produtividade de grãos de arroz irrigado do estado do Rio Grande do Sul, principalmente no final do século XXI, quando o período de semeadura poderá ser antecipado. Entre as regiões orizícolas houve variação do efeito da mudança no clima sobre a produtividade, sendo a Fronteira Oeste menos favorecida e a Zona Sul a mais favorecida no cenário futuro.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Aquecimento global. *Oryza sativa*.

ABSTRACT

Doctor of Science Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

SIMULATING GRAIN YIELD OF IRRIGATED RICE IN A CLIMATE CHANGE SCENARIO IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE

AUTHOR: LIDIANE CRISTINE WALTER

ADVISOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Location and date of presentation: Santa Maria, February 27th, 2014.

Projections of a possible climate change indicate that the current CO₂ concentration is expected to double and air temperature increase by up to 6°C by the end of this century, leading to changes in crops yield. The impact of climate change on irrigated rice in conditions of Southern Brazil should be positive, with increases in potential grain yield. However, there are few studies to assess the impact of climate change in Rio Grande do Sul, a State with an important role in rice production in the country. Thus, the objective of this study was to simulate the impact of climate change on rice grain yield in Rio Grande do Sul in a climate change scenario based on the IPCC A1B scenario. The grain yield was simulated with the SimulArroz model for three maturity groups (early, middle and late), seven sowing dates (01/08, 01/09, 01/10, 01/11, 01/12, 01/01 and 01/02) at different levels of crop management (technological level), in the six rice production regions of the State. The results indicate that climate change expected for the A1B scenario will have a positive effect on grain yield of rice in Rio Grande do Sul State, mainly at the end of the century, when the sowing period may be anticipated. There were variations on the effect of climate change on yield among the rice production regions with the West part of the State the least favored region and the Southern part of the State the most favored in the future scenario.

Key words: Crop model. Modeling. Global warming. *Oryza sativa*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção e produtividade histórica de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul, nas safras de 1921/22 a 2012/13.	15
Figura 2. Regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.	19
Figura 3. Área colhida (x 1000 ha) e produtividade ($Mg\ ha^{-1}$) de arroz irrigado na safra 2012/13, nas seis regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.	20
Figura 4. Fluxograma da aclimação das plantas ao CO_2 elevado, no curto prazo de exposição (minutos e horas).	26
Figura 5. Porcentagem de mudança na distribuição da biomassa para os principais compartimentos da planta de arroz em ambiente enriquecido com CO_2 (FACE), em relação ao CO_2 ambiente, com avaliações em diferentes estágios de desenvolvimento.	31
Figura 6. Níveis de tecnologia considerados no modelo SimulArroz.	36
Figura 7. Regiões orizícolas do estado do RS.	38
Figura 8. Tela inicial do software SimulArroz.	41
Figura 9. Diagrama esquemático do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado no modelo SimulArroz, indicando os principais estágios de desenvolvimento em cada fase.	42
Figura 10. Função de resposta da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) à temperatura média diária do ar usada no SimulArroz.	43
Figura 11. Função de resposta da eficiência de uso da radiação ao aumento de CO_2 atmosférico usado no SimulArroz.	44
Figura 12. Correção da tendência tecnológica da produtividade de grãos de arroz irrigado nas regiões orizícolas do estado do RS, na série histórica 1994/95 – 2012/13.	49
Figura 13. Evolução da concentração de CO_2 na atmosfera baseado no cenário A1B.	50
Figura 14. Curva anual da temperatura mínima do ar, nas seis regiões orizícolas do estado do RS, nos quatro períodos do cenário climático A1B.	51
Figura 15. Curva anual da temperatura máxima do ar, nas seis regiões orizícolas do estado do RS, nos quatro períodos do cenário climático A1B.	52
Figura 16. Curva anual da radiação solar, nas seis regiões orizícolas do estado do RS, nos quatro períodos do cenário climático A1B.	53
Figura 17. Produtividade simulada x observada (sem tendência tecnológica) no período 1984/85 – 2013/14 para as regiões orizícolas do estado do RS.	54
Figura 18. Produtividade potencial de arroz irrigado com umidade do grão de 13% média do Rio Grande do Sul (a), número de espiguetas produzidas (b), esterilidade de espiguetas por calor (c) e por frio (d) e frequência de anos com ocorrência de morte das plantas por geada (e) estimadas com o modelo SimulArroz em semeaduras mensais de agosto a fevereiro no cenário A1B.	56
Figura 19. Mapa das tendências da produtividade de grãos de arroz irrigado no período 1960-2099, simulada com o modelo SimulArroz (nível tecnológico médio) no cenário climático A1B.	59
Figura 20. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de agosto no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a),	

	1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	61
Figura 21.	Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de setembro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	62
Figura 22.	Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de outubro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	64
Figura 23.	Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de novembro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	65
Figura 24.	Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de dezembro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	66
Figura 25.	Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de janeiro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	67
Figura 26.	Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de fevereiro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.....	68
Figura 27.	Esterilidade de espiguetas (%) causada por temperaturas elevadas em diferentes datas de semeadura e períodos do cenário A1B, nas regiões orizícolas do estado do RS.....	69
Figura 28.	Esterilidade de espiguetas (%) causada por temperaturas baixas em diferentes datas de semeadura e períodos do cenário A1B, nas regiões orizícolas do estado do RS.....	70
Figura 29.	Frequência de anos com ocorrência de danos causados por geada em diferentes datas de semeadura e períodos do cenário A1B, nas regiões orizícolas do estado do RS.....	70
Figura 30.	Produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹) de arroz irrigado para o estado do RS, no cenário climático A1B, período atual (1995-2029), em diferentes grupos de maturação: precoce (a), médio (b) e tardio (c).	72
Figura 31.	Anomalia na produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹) de arroz irrigado para o estado do RS, do período de clima futuro (2065-2099) em relação ao atual (1995-2029), em diferentes grupos de maturação: precoce (a), médio (b) e tardio (c), cenário climático A1B.....	72
Figura 32.	Produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹) de arroz irrigado para o estado do RS, no cenário climático A1B, período atual (1995-2029), em diferentes níveis tecnológicos da lavoura: baixo (a), médio (b) e alto (c).....	73
Figura 33.	Anomalia na produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹) de arroz irrigado para o estado do RS, do período de clima futuro (2065-2099) em relação ao atual (1995-2029), em diferentes níveis tecnológicos da lavoura: baixo (a), médio (b) e alto (c), cenário climático A1B.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 A cultura do arroz	14
2.1.1 Temperatura	16
2.1.2 Radiação solar	17
2.2 Regiões orizícolas do Rio Grande do Sul	18
2.3 Mudança climática	22
2.4 Aclimação das plantas ao CO ₂ elevado	24
2.4.1 Aclimação no curto prazo	25
2.4.2 Aclimação em longo prazo	28
2.5 Modelagem matemática	32
2.6 O modelo SimulArroz	34
2.7 Cenários climáticos e incertezas	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 Cenário climático	38
3.2 Descrição do modelo	40
3.3 Rodadas do modelo SimulArroz	47
3.4 Correção da tendência tecnológica	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A concentração de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) está aumentando (SOMBROEK & GOMES, 1996; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2013). As atividades antropogênicas após a revolução industrial, com o uso de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra são a principal causa do aumento das emissões destes gases (IPCC, 2013).

O efeito direto do incremento da concentração de CO₂ nas plantas é a possibilidade de aumento da taxa de crescimento e da produtividade das culturas no futuro, uma vez que o CO₂ é o substrato primário para a fotossíntese (ROSENBERG et al., 1983; STRECK, 2005; TAIZ & ZEIGER, 2009). No entanto, o aumento da concentração de gases de efeito estufa pode causar uma elevação na temperatura do ar (IPCC, 2013). O aumento na temperatura do ar pode reduzir ou anular os efeitos benéficos do CO₂ sobre as plantas (STRECK, 2005). A mudança climática, segundo Aggarwal & Mall (2002), ainda pode causar efeitos indiretos na produção das culturas, como alterações na disponibilidade de água para a irrigação, competição com pragas, doenças e invasoras, alterações na fertilidade do solo e erosão.

Um trabalho de simulação para o município de Santa Maria, na região central do estado do Rio Grande do Sul (WALTER et al., 2010) indicou que a produtividade potencial de grãos de arroz irrigado aumenta em cenários sintéticos de mudança climática. No entanto, a região central do RS é apenas uma das seis regiões orizícolas do estado (IRGA, 2005; SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI, 2012), as quais têm grande importância na produção do grão no país, pois o estado é responsável por mais da metade da produção nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2013). Frequentemente a produtividade das lavouras comerciais de arroz irrigado nas diferentes regiões do estado pode ser abaixo da produtividade potencial, por influência de fatores bióticos ou abióticos durante o ciclo de desenvolvimento, como o manejo da adubação e da irrigação da lavoura e o ataque de pragas e doenças

(SOSBAI, 2012). Por isso, é importante que a influência destes fatores seja considerada em estudos de simulação da produtividade.

Um modelo de simulação de arroz foi testado utilizando dados experimentais e de lavouras em vários locais do Rio Grande do Sul (ROSA, 2013). O modelo SimulArroz (STRECK et al., 2013a) foi utilizado para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do arroz no estado do Rio Grande do Sul, apresentando boa precisão na simulação (ROSA, 2013). O modelo SimulArroz pode ser usado para simular o impacto de mudanças climáticas sobre a produtividade de grãos da cultura do arroz irrigado no estado.

Espera-se que a mudança climática tenha influência sobre a cultura do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul, podendo afetar de forma diferente cada uma das seis regiões do estado, dependendo da cultivar utilizada e nível de manejo da lavoura. No entanto, estudos sobre o impacto de mudanças climáticas sobre as plantas são difíceis de serem realizados experimentalmente, sendo os modelos matemáticos ferramentas muito usadas nestes casos. Assim, os objetivos desta tese são:

- a) Utilizar um modelo de simulação para estimar a produtividade de grãos de arroz irrigado nas seis regiões orizícolas do estado do RS em um cenário climático futuro que inclui aumentos na temperatura do ar e na concentração do CO₂ atmosférico;
- b) Verificar possíveis implicações nas recomendações atuais de época de semeadura na cultura do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul em cenários futuros;
- c) Caracterizar as regiões orizícolas do estado quanto à produtividade de grãos de arroz irrigado em diferentes datas de semeadura no cenário A1B;
- d) Avaliar a produtividade de grãos de diferentes grupos de maturação de arroz irrigado, em uma ampla faixa de semeadura e diferentes níveis tecnológicos da lavoura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura do arroz

O arroz (*Oryza sativa*) é o segundo cereal mais produzido no mundo (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA, 2013) e faz parte da dieta básica de aproximadamente 50% da população mundial (FAGERIA et al., 2003; LUZZARDI et al., 2005). No Brasil são cultivados anualmente cerca de 2,4 milhões de hectares com arroz (USDA, 2013), dos quais 1,3 milhões de hectares são de várzeas, onde é cultivado arroz irrigado por inundação (FAGERIA et al., 2003). O Brasil é o maior produtor de arroz fora da Ásia e o volume da produção Brasileira representa cerca de 2% da produção mundial e mais de 50% da produção da América do Sul (USDA, 2013). A região Sul do Brasil (RS, SC e PR) é a principal produtora, com cerca de 80% do total produzido no País. O Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor Nacional, representando 69% do arroz colhido no País (IBGE, 2013), alcançando elevados valores de produtividade, principalmente em função do método de irrigação por inundação, que apresenta uma série de vantagens em relação aos demais sistemas de cultivo. Atualmente a média da produtividade de grãos de arroz no estado do RS é de aproximadamente 7,5 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2013), bem acima da média Brasileira (4,34 Mg ha⁻¹) e mundial (4,45 Mg ha⁻¹) (USDA, 2013).

Na série histórica de registros do IRGA (IRGA, 2013) para o estado do RS, pode-se observar que a produtividade de grãos de arroz irrigado teve um aumento considerável desde o início dos registros em 1921, que se refletiu no aumento do volume de produção do estado do RS (Figura 1). Esse aumento do volume de produção de arroz observado no RS na série histórica apresentada ocorreu em função do aumento da área cultivada e da produtividade de grãos de arroz no estado. A produtividade de grãos aumentou com a introdução das cultivares do tipo moderno no final da década de 1970, cujas plantas possuem como características morfológicas de baixa estatura (cultivares semi-anãs) e folhas eretas, entre outras, que lhes conferem um alto potencial produtivo. Além da adoção das novas

cultivares, o aumento na produtividade de grãos ao longo da série de dados também pode ser atribuído ao aprimoramento das práticas de manejo realizadas nas lavouras, como data de semeadura mais adequada, aumento no uso de defensivos agrícolas e adubação, e maior controle de plantas daninhas, principalmente o arroz vermelho.

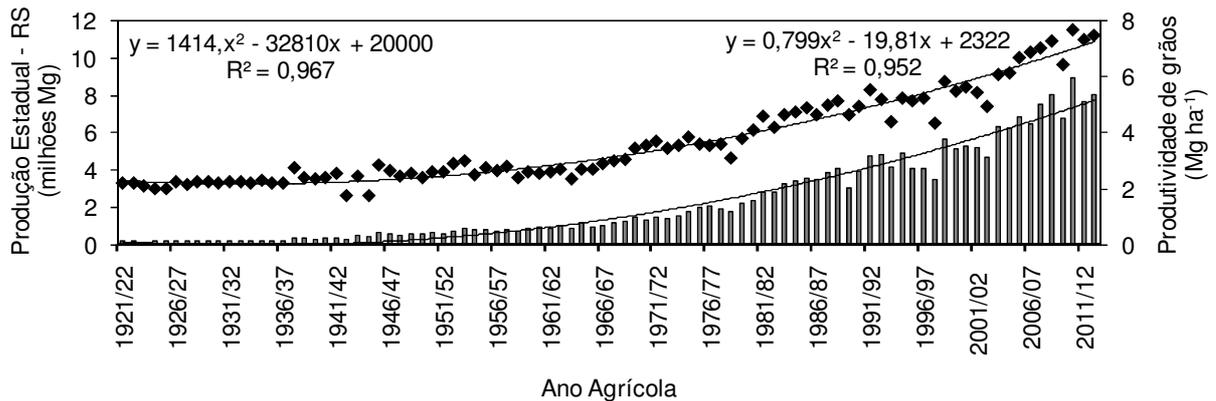


Figura 1. Produção e produtividade histórica de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul, nas safras de 1921/22 a 2012/13.

♦ Produtividade; | Produção estadual
Adaptado de IRGA (2013).

As elevadas produtividades obtidas pela cultura do arroz no Rio Grande do Sul ocorrem pelo ambiente favorável associado a um manejo eficiente, com o cultivo no sistema de irrigação por inundação, que favorece o crescimento e o desenvolvimento da cultura e inibe o aparecimento de muitas plantas daninhas. Normalmente, elevadas produtividades estão associadas a um bom aporte fotossintético da planta, o que significa que a cultura precisa produzir uma quantidade de biomassa considerável, dando condições para que a formação e o enchimento de grãos sejam elevados. Para que isso ocorra, a planta precisa estar bem nutrida, com atenção especial à adubação nitrogenada, pois o nitrogênio é essencial para a fotossíntese (TAIZ & ZEIGER, 2009). Uma adequada adubação nitrogenada estimula o crescimento vegetativo e, como consequência, a maior biomassa produzida dá o aporte necessário para alcançar elevadas produtividades de grãos. Neste sentido, as recomendações de adubação nitrogenada para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul são relacionadas ao incremento de produtividade pretendido, a partir do potencial de produção das diferentes regiões orizícolas (SOSBAI, 2012).

Apesar dos níveis crescentes de produtividade da cultura do arroz no estado do Rio Grande do Sul, causados pelo aprimoramento das técnicas agronômicas, há uma considerável variabilidade interanual na produtividade de grãos devido, principalmente, às condições meteorológicas ao longo dos anos nas diferentes regiões produtoras. As variações da temperatura do ar e da radiação solar, durante as fases críticas da planta, são os principais elementos climáticos relacionados com esta variabilidade (SOSBAI, 2007; STEINMETZ, 2004). Oldeman et al. (1986) observaram que em arroz cultivado em áreas inundadas, sem restrições hídricas e outros fatores de estresse, a produtividade potencial está relacionada, principalmente, à temperatura do ar e à radiação solar global.

2.1.1 Temperatura

A temperatura é um dos elementos meteorológicos que afeta o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do arroz (SIÉ et al., 1998). A temperatura do ar mais favorável ao desenvolvimento do arroz irrigado situa-se entre 20 e 35°C (YOSHIDA, 1981). De maneira geral, a cultura exige temperaturas elevadas e crescentes até a floração e decrescentes após a floração (porém sem quedas bruscas) (STEINMENTZ, 2004). Segundo Yoshida (1981) as faixas de temperatura ótima variam de 20 a 35°C para germinação, de 30 a 33°C para a fase de floração (antese) e de 20 a 25°C para a maturação. Essas faixas de temperatura podem variar entre as cultivares de arroz.

A temperatura, tanto baixa quanto alta, é um fator crítico principalmente durante a fase reprodutiva. Segundo Yoshida (1981), o período de aproximadamente 7 a 14 dias antes da emissão das panículas, também chamado período de emborrachamento, é considerado o mais sensível às baixas temperaturas do ar, seguido pelo período da floração (SOSBAI, 2012). Bouman et al. (2004) infere que, a cultura do arroz começa a sofrer influência do frio na esterilidade de espiguetas com a temperatura média diária do ar menor que 22°C, quando começa o acúmulo de graus-dia de frio para a esterilidade de espiguetas. De modo geral, um acúmulo térmico de graus-dia de frio acima de 100 graus dia pode causar até 100% de esterilidade de espiguetas (BOUMAN et al., 2004).

Por outro lado, temperaturas acima dos 34°C durante o período de emborrachamento reduzem a fertilidade das espiguetas. A fase mais sensível a altas temperaturas é a floração, seguida pela fase de pré-floração, aproximadamente nove dias antes da emissão das panículas (STEINMETZ, 2004). Temperaturas de 35°C durante a antese podem causar de 20 a 30% de esterilidade de espiguetas em arroz irrigado (MATSUI et al., 1997). Matthews et al. (1997), utilizaram dois modelos de simulação de rendimento do arroz e encontraram diferenças de produtividade entre as regiões em resposta à aumentos de temperatura. Isso foi explicado pela diferença na quantidade de dias com temperaturas acima da ótima, dependendo do clima de cada local, resultando em maior ou menor efeito sobre a esterilidade de espiguetas e sobre a duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares.

Estudando o efeito da mudança climática na esterilidade de espiguetas em arroz pode-se citar os resultados de pesquisas realizadas por Matsui et al. (1997) em câmaras de crescimento, onde foram considerados dois níveis de CO₂ (ambiente e +300 ppm) e temperatura (ambiente e +4°C). Os resultados mostram que considerando somente o incremento de CO₂, não houve efeito significativo sobre as espiguetas, pois o CO₂, isoladamente, proporciona um maior número de perfilhos produtivos, tendo pouco efeito na esterilidade das espiguetas. Em relação à temperatura, a antese é a fase mais sensível às temperaturas elevadas, e a temperatura crítica para o florescimento ficou entre 33 e 34°C. Quando a temperatura crítica é ultrapassada, mesmo por poucas horas, ocorre uma grande esterilidade de espiguetas, devido à menor deposição de grãos de pólen, e em temperaturas extremas (>35°C) ocorre esterilidade dos órgãos femininos da flor.

2.1.2 Radiação solar

A radiação solar tem efeito direto na produtividade de arroz. Em regiões e épocas do ano em que a temperatura não é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento das plantas, a radiação solar é um dos principais fatores que influenciam na produção do arroz (CARMONA et al., 2002). A necessidade de radiação solar varia ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz. Os maiores incrementos na produtividade, para níveis crescentes de radiação solar, são

obtidos durante as fases reprodutiva e de maturação, enquanto que a fase vegetativa apresenta uma baixa resposta à radiação solar. Produtividades em torno de 5.000 kg de grãos de arroz por hectare podem ser alcançadas com níveis de radiação solar de aproximadamente $12,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ durante a fase reprodutiva (YOSHIDA & PARAO, 1976), valores facilmente verificados no estado do RS durante o período reprodutivo da cultura (MOTA et al., 1995).

A data de semeadura é um dos fatores mais importantes para obtenção de alta produtividade, e a recomendação dos períodos mais favoráveis para a semeadura é baseada em critérios que fazem com que as fases críticas do desenvolvimento da planta coincidam com as condições ambientais mais favoráveis. As condições ambientais favoráveis neste caso referem-se à radiação solar disponível no período de floração da planta de arroz, pois neste momento do ciclo a quantidade de radiação solar define o número de grãos produzidos por panícula, um dos componentes do rendimento da cultura (BOUMAN et al., 2004). A semeadura na época correta garante uma disponibilidade de radiação solar elevada na floração, o que é essencial para um bom potencial produtivo na cultura do arroz irrigado. O período recomendado para a semeadura pode variar de acordo com o município, tipo de solo no local e grupo de maturação da cultivar utilizada. Conforme o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2013/2014, o período indicado para a semeadura do arroz irrigado no estado varia de 1° de setembro a 20 de dezembro. Quanto mais longo o ciclo da cultivar, mais cedo ela deve ser semeada e menor é o período favorável para a semeadura (BRASIL, 2013). Dados do IRGA (IRGA, 2005) indicam que na safra 2004/05 mais de 50% da área foi semeada entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro.

2.2 Regiões orizícolas do Rio Grande do Sul

O estado do Rio Grande do Sul possui seis regiões orizícolas (IRGA, 2005; SOSBAI, 2012), onde se cultiva o arroz irrigado por inundação (Figura 2). A seguir serão descritas as características das regiões produtoras de arroz do Rio Grande do Sul.



Figura 2. Regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: IRGA, 2005.

Fronteira Oeste (1); Campanha (2); Depressão Central (3); Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos (4); Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos (5) e Zona Sul (6).

A Fronteira Oeste é a região do estado com a maior área colhida de arroz, com aproximadamente 329 mil hectares na safra 2012/13 (IRGA, 2013), com uma produtividade média de 7,5 Mg por hectare (Figura 3). Esta extensão territorial ocupada com a cultura de arroz na região, também torna a Fronteira Oeste a região orizícola mais importante em volume de produção do estado. Nesta região destacam-se os municípios de Uruguaiana e Itaqui, com áreas colhidas de aproximadamente, 81 mil hectares e produtividades médias de 7,8 e 7,4 Mg por hectare, respectivamente (IRGA, 2013).

Os solos cultivados com arroz na Fronteira Oeste, segundo Anghinoni et al. (2004) se caracterizam por terem um pH baixo (abaixo de 5.0), por uma saturação de bases baixa, matéria orgânica variando de média a baixa e predominância de solos com teor de argila baixo (entre 11 e 25%).

A região da Fronteira Oeste se caracteriza pela temperatura elevada, o que faz com que a probabilidade de ocorrência de dias com temperaturas mínimas do ar menores ou iguais a 15°C seja a menor do estado, ficando a média em torno de 2 dias em dezembro, 4 dias em janeiro e fevereiro e, em torno de 8 dias com temperaturas menores ou iguais a 15°C em março (STEINMETZ et al. 2003,

STEINMETZ & ALMEIDA, 2012). Esta característica de temperatura mais elevada se deve principalmente a alta radiação solar disponível na região e à baixa precipitação (MOTA, 1995), permitindo que na região da Fronteira Oeste o período de semeadura possa ser antecipado.

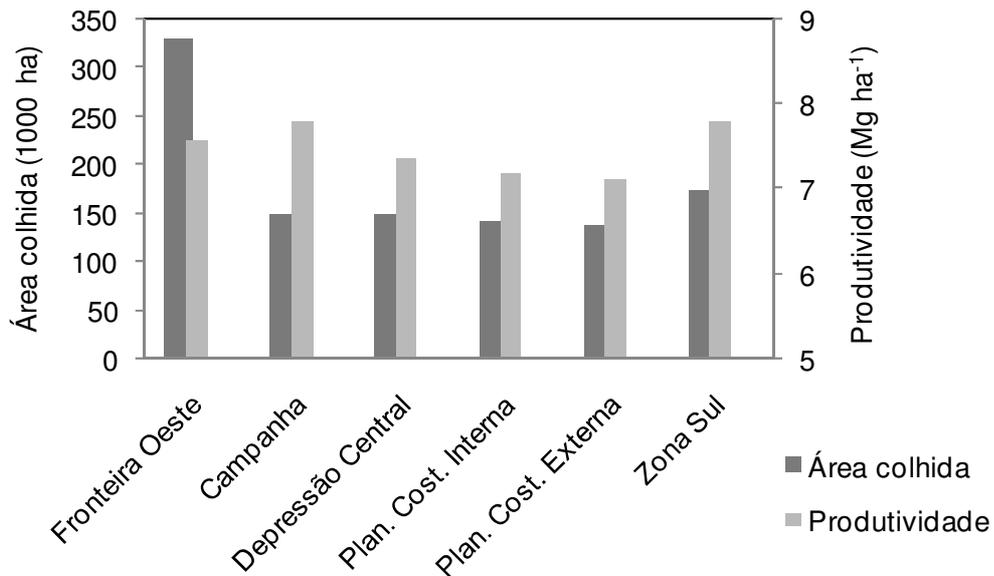


Figura 3. Área colhida (x 1000 ha) e produtividade (Mg ha⁻¹) de arroz irrigado na safra 2012/13, nas seis regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.

Adaptado de IRGA (2013).

Segundo Mota (1995) e Mota et al. (1999) a região da Fronteira Oeste apresenta as melhores condições climáticas para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, principalmente pelas características de temperatura do ar e altos índices de radiação solar incidente. Essas condições climáticas favoráveis contribuem diretamente para os elevados valores de produtividade de grãos observados nesta região.

A região da Campanha destaca-se com alta produtividade de grãos, alcançando os maiores valores entre as regiões orizícolas do estado, juntamente com a região da Zona Sul (Figura 3). Os municípios de Dom Pedrito, São Gabriel e Rosário do Sul são responsáveis por mais de 50% da produção de grãos da região. Possui áreas de cultivo de arroz em solos situados em patamares mais elevados ou em terras adjacentes às várzeas, de relevo suave ondulado a plano. De maneira

geral, os solos desta região têm pH entre 4,5 a 5,4 e saturação de bases baixa (ANGHINONI et al., 2004).

As regiões da Campanha e extremo sul do estado podem ser consideradas regiões com riscos acentuados de perdas de produtividade causados por temperaturas baixas. Durante os meses em que a cultura do arroz está emergindo nas lavouras da região há grandes probabilidades de ocorrência de temperaturas baixas, o que se reflete em uma menor temperatura do solo e em atraso do período recomendado de semeadura e por consequência menor período para semeadura dentro das condições ideais. Além disso, Steinmetz et al. (2003), mapeando as probabilidades de ocorrência de temperaturas baixas no Estado do Rio Grande do Sul, observaram que, a partir do segundo decêndio de março, há probabilidades superiores a 60% de ocorrência de 3 ou mais dias com temperaturas iguais ou inferiores a 15°C na região, aumentando o risco de frio também no final do ciclo da cultura.

A região fisiográfica da Depressão Central possui o maior número de lavouras, caracterizando-se por pequenas propriedades. O município de Cachoeira do Sul se destaca com aproximadamente 25% da produção da região (IRGA, 2013). Os solos cultivados com arroz nesta região, segundo Anghinoni et al. (2004) se caracterizam por ter um pH baixo (abaixo de 5,0), por uma saturação de bases baixa, matéria orgânica variando de média a baixa e predominância de solos com teor de argila baixo (entre 11 e 25%).

As Planícies Costeiras Interna e Externa à Lagoa dos Patos representam a menor contribuição em volume de produção do estado e, embora detenham as menores produtividades de grãos do estado, estas ainda são elevadas e acima da média nacional. São regiões, de modo geral, com menores probabilidades de ocorrência de temperaturas iguais ou superiores a 35°C nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (MOTA et al., 1999). Algumas lavouras destas regiões apresentam índices elevados de salinidade no solo.

A região fisiográfica do estado denominada de Zona Sul apresenta área cultivada e volume de produção expressivo, além de ser caracterizada por um baixo número de lavouras com grandes extensões territoriais. Foi a segunda região com maior área colhida, com mais de 170 mil hectares colhidos na safra 2012/13 (IRGA, 2013). Estas características aliadas à alta disponibilidade de radiação solar (MOTA, 1995) propiciaram a esta região a obtenção da maior produtividade média entre as

regiões, juntamente com a região da Campanha (IRGA, 2013). No entanto, segundo Mota et al. (1999) e Steinmetz et al. (2003) o extremo sul do estado apresenta alto risco de frio. Esta característica pode ser a responsável pela variação de produtividade entre as safras observada nesta região.

2.3 Mudança climática

A concentração de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) na atmosfera terrestre, pode sofrer alterações em decorrência de forçantes naturais ou pela interferência da atividade humana (IPCC, 2013). De acordo com o quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC, 2013), a ação antrópica tem contribuído para um aumento significativo na concentração de CO_2 na atmosfera terrestre, entre outros gases de efeito estufa. Este aumento ocorreu principalmente a partir da revolução industrial, quando o crescimento das grandes cidades e indústrias fez aumentar a queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) lançando uma enorme quantidade de CO_2 e outros poluentes na atmosfera.

Segundo estimativas citadas no IPCC (2007) os valores pré industriais da concentração de CO_2 seriam de 280 ppm em 1750, oscilando entre 180 e 300 ppm durante 650.000 anos, sendo historicamente muito abaixo dos valores observados atualmente. Com base nestas indicações de aumento recente na concentração de CO_2 na atmosfera terrestre, e considerando que a queima de combustíveis fósseis (na indústria, usinas termoeletricas, automóveis, etc.) é uma característica do atual modelo de sociedade, não se espera que as emissões de gases de efeito estufa diminuam significativamente nos próximos anos. Esta realidade nos leva a cenários futuros com elevadas concentrações de CO_2 na atmosfera terrestre, que, segundo projeções descritas por Moss et al. (2010), podem ser maiores que 1370 ppm em 2100.

Como resultado do aumento da concentração destes gases, espera-se que esteja aumentando o efeito estufa da atmosfera terrestre, podendo levar a um aquecimento global (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 2013). Estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM - General Circulation Models)

indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6°C na temperatura média do ar até o final do século XXI em vários locais do Planeta (MAHLMAN, 1997; IPCC, 2007), incluindo o Brasil (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001; ASSAD et al., 2004). As conclusões do Grupo de Trabalho I do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2007) para a região Sul do Brasil prevêem aumentos de 1,5°C (no cenário mais otimista) a 5,5°C (no cenário mais pessimista) até 2100. Outros elementos meteorológicos como precipitação, nebulosidade, radiação solar incidente e evaporação apresentam tendências variáveis em função da escala (global ou regional) em que as séries meteorológicas são analisadas e os modelos são aplicados (HULME et al., 1994; THOMAS, 2000; WEISS et al., 2003; KERR, 2005; IPCC, 2007, 2013).

A concentração de CO₂ na atmosfera interfere diretamente em um importante processo fisiológico nos vegetais, a fotossíntese, que é o processo fisiológico em que as plantas transformam a energia luminosa em energia química, através da síntese de compostos carbonados, que serão utilizados em diversos processos do metabolismo vegetal, além de ser fonte de energia para as demais formas de vida (TAIZ & ZEIGER, 2009). Bioquimicamente, a fotossíntese consiste em uma série de reações químicas, em que inicialmente a luz é utilizada na quebra da molécula da água, gerando energia para o processo, que será concluído pela incorporação do carbono do CO₂ em compostos orgânicos. Este importante metabolismo, responsável pela produção da biomassa vegetal, é abastecido pelo CO₂ atmosférico, que entra na folha através dos estômatos, difundindo-se pelo parênquima até os cloroplastos onde o processo fotossintético ocorre (TAIZ & ZEIGER, 2009).

Por ser um substrato primário para que o processo de fotossíntese ocorra, a quantidade de CO₂ disponível para as plantas tem efeito direto na taxa fotossintética, que tende a ser maior quando a concentração deste gás na atmosfera também é maior (TAIZ & ZEIGER, 2009). O aumento da concentração de CO₂ desde a revolução industrial e as projeções futuras deste componente atmosférico estabelecem um cenário favorável ao aumento da fotossíntese, e conseqüentemente, da produtividade primária em comunidade vegetais, com potencial impacto positivo sobre o desempenho de agroecossistemas. Segundo Taiz & Zeiger (2009) a taxa fotossintética da maioria das espécies vegetais pode ter um aumento de 30 a 60% em ambiente com concentrações de 600 a 700 ppm de CO₂ atmosférico, em relação à taxa de fotossíntese com 370 ppm de CO₂ na atmosfera.

Plantas com metabolismo C_3 , como o arroz, são mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO_2 atmosférico do que plantas com metabolismo C_4 (TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). Plantas com metabolismo C_4 , devido a modificações morfofisiológicas no aparato fotossintético, utilizam com eficiência o CO_2 presente no ar atmosférico nas concentrações atuais. Resultados experimentais que mostram aumento na biomassa seca e rendimento comercial de algumas culturas em resposta ao dobro da concentração do CO_2 são apresentados por Streck (2005). O aumento varia de acordo com a cultura, sendo que o incremento médio é de 23%, 32%, 42%, 54% e 52% para frutas, cereais C_3 , folhosas, legumes e raízes, respectivamente.

2.4 Aclimação das plantas ao CO_2 elevado

O aumento da taxa fotossintética em função do aumento da concentração de CO_2 na atmosfera é um efeito direto da atividade fisiológica das plantas em resposta ao ambiente. Entretanto o aumento da fotossíntese não é constante ao longo do período de exposição e pode não ser permanente, ou seja, a intensidade da resposta das plantas é variável em função da espécie e da concentração de CO_2 . Além disso, a resposta pode ser reduzida após um período de exposição, em função de uma série de ajustes bioquímicos e/ou metabólicos dos processos fisiológicos em decorrência desta exposição, processo denominado de aclimação (CALIMAN, 2008). A aclimação das plantas à elevada concentração de CO_2 atmosférico consiste em uma série de alterações no metabolismo vegetal em diferentes níveis de organização (desde molecular e bioquímico até anatômico e morfológico). Considerando a escala de tempo para que aconteça a aclimação, algumas alterações podem se desenvolver após um curto período de exposição (minutos/horas), denominada aclimação no curto prazo, enquanto outras ocorrem após um longo período de exposição (dias/semanas), denominada aclimação no longo prazo (CALIMAN, 2008). A aclimação da fotossíntese leva a uma preocupação a respeito de sua consequência na resposta do crescimento e produtividade das culturas agrícolas ao aumento da concentração de CO_2 atmosférico projetada até o final do século XXI.

2.4.1 Aclimação no curto prazo

O metabolismo vegetal, quando exposto à elevadas concentrações de CO₂, passa por diversas alterações, que objetivam a auto-regulação dos processos bioquímicos e fisiológicos, tendendo ao retorno ao estado inicial de equilíbrio. Esta auto-regulação pode acontecer logo após o início da exposição, processo denominado de aclimação a curto prazo, que ocorre na escala de tempo de minutos ou horas após o início da exposição ao CO₂ elevado (CALIMAN, 2008). Diversos processos do metabolismo vegetal são afetados em um curto prazo após o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, como pode ser visualizado na Figura 4, e que serão descritos com mais detalhes no decorrer do texto.

Quando há maior concentração de CO₂, substrato primário para a fotossíntese, inicialmente a taxa fotossintética aumenta, pois haverá mais CO₂ nos sítios de troca da enzima Ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco), responsável pela carboxilação primária no Ciclo de Calvin-Benson, aumentando a produção de fotoassimilados. A maior concentração de CO₂ na atmosfera faz com que a concentração deste gás no interior da folha também aumente, aumentando a eficiência fotossintética por diminuir a fotorrespiração. A fotorrespiração, segundo TAIZ & ZEIGER (2009) é o processo bioquímico em que a enzima Rubisco, responsável pela carboxilação na fotossíntese, catalisa a reação de oxigenação ao invés da carboxilação, por ter afinidade tanto pelo CO₂ quanto pelo O₂ em seu sítio ativo, o que caracteriza perda de eficiência no processo fotossintético. Como o O₂ e o CO₂ competem pelo mesmo sítio ativo, aumentando a concentração do CO₂ no interior da folha, a reação de carboxilação será favorecida, aumentando a taxa fotossintética em ambiente com maior concentração de CO₂.

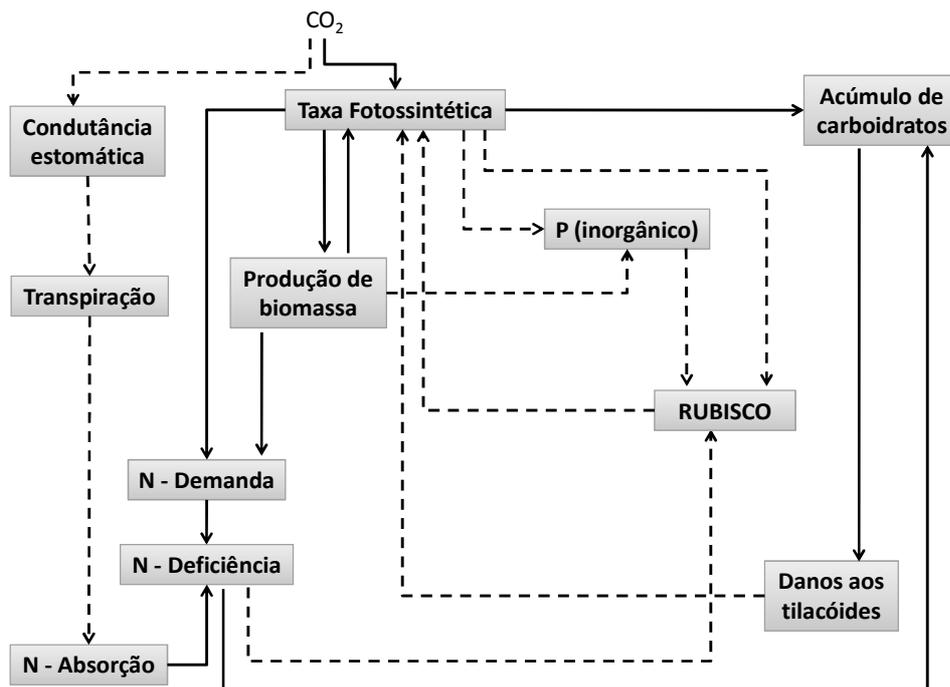


Figura 4. Fluxograma da aclimação das plantas ao CO₂ elevado, no curto prazo de exposição (minutos e horas).

————> Efeito de aumento - - - - -> Efeito de diminuição

Devido à fotossíntese ser um processo bioquímico que depende da presença e atuação de diversas enzimas e moléculas, o aumento da taxa fotossintética não é contínuo ao longo do tempo (TAIZ & ZEIGER, 2009). À medida que a fotossíntese aumenta, as enzimas (como a Rubisco) vão sendo consumidas no processo, e o metabolismo de regeneração destas enzimas, além do suprimento de energia na forma de ATP, não é suficiente para atender à necessidade demandada pelos órgãos fotossintéticos (YELLE et al., 1989a; CHEN et al., 2005). Esta deficiência metabólica inicial é considerada uma das formas primárias de auto-regulação do metabolismo, que ocorre por uma limitação na quantidade de enzima disponível para catálise do processo fotossintético (Figura 4). Portanto, num primeiro momento o aumento da concentração de CO₂ atmosférico aumenta a taxa fotossintética, que imediatamente fica limitada em função do maior consumo de Rubisco e energia, que não são supridas na mesma velocidade.

Mesmo com algumas limitações metabólicas, inicialmente o aumento da taxa fotossintética em ambientes com elevada concentração de CO₂ favorece a produção de biomassa vegetal e a produtividade (KRISHNAN et al., 2007). No final do processo de fotossíntese são sintetizadas cadeias carbonadas, ou carboidratos, que

serão posteriormente utilizados em diversas rotas metabólicas do vegetal, na síntese de outros compostos orgânicos, tanto estruturais (que constituirão a estrutura do vegetal), quanto compostos do metabolismo vegetal. Quando a produção de carboidratos é elevada, além da capacidade de síntese destas rotas metabólicas, nem todos os esqueletos carbonados produzidos são utilizados, acumulando-se como carboidratos não-estruturais, principalmente na forma de amido (DELUCIA et al., 1985) e sacarose. Em *Arabidopsis thaliana*, a quantidade de amido e sacarose foi 132 e 43% mais elevada nas folhas das plantas que cresceram em ambiente com elevada concentração de CO₂ (1000 ppm) comparado com as plantas que cresceram em 360 ppm (BAE & SICHER, 2004).

O amido é sintetizado pelos vegetais quando há excesso de carboidratos disponíveis, sendo, portanto uma forma de reserva (TAIZ & ZEIGER, 2009). A síntese e o acúmulo do amido ocorrem no interior dos cloroplastos, organelas responsáveis pela fotossíntese nos vegetais. Quando o acúmulo de amido é muito grande, poderá haver danos mecânicos nos tilacóides do cloroplasto, em função do crescimento excessivo dos grãos de amido, prejudicando o processo de fotossíntese e, portanto reduzindo a taxa fotossintética (DELUCIA et al., 1995).

Uma das principais rotas metabólicas para os carboidratos produzidos no processo fotossintético é a síntese de aminoácidos (TAIZ & ZEIGER, 2009), precursores das proteínas. Neste processo, um grupo carboxila (COOH) e um grupo amina (NH₂) são adicionados às cadeias carbonadas dos carboidratos, consumindo, entre outros compostos e enzimas, o nitrogênio (N). A quantidade de nitrogênio presente no interior das folhas para este metabolismo é, portanto, outro fator limitante para a manutenção das altas taxas fotossintéticas em elevadas concentrações de CO₂ atmosférico em curto prazo (KIM et al., 2011). O aumento da taxa fotossintética, juntamente com a maior produção de carboidratos, fará com que a demanda de N seja bastante elevada e este maior consumo de N, conseqüentemente ocasionará uma potencial deficiência de N nas folhas (Figura 4). Este processo leva a outra forma de auto-regulação, visto que com a deficiência de N, haverá acúmulo de carboidratos que não serão utilizados na síntese de aminoácidos (TRICKER et al., 2004). Além disso, o nitrogênio também é um dos principais componentes da molécula de clorofila, do ATP (fonte de energia para muitos processos metabólicos), e é componente essencial na ativação da Rubisco (TAIZ & ZEIGER, 2009). Em função disso, a deficiência de N tem grande influência

na taxa fotossintética, resultando em mais uma forma de auto-regulação do metabolismo vegetal em elevadas concentrações de CO₂ na atmosfera, segundo BAE & SICHER (2004), ou seja, se o suprimento de N é suficiente, a aclimação à fotossíntese é mínima.

A maior concentração de CO₂ atmosférico causa redução na condutância estomática (SHIMONO et al., 2010). A menor abertura estomática reduz as perdas de água por transpiração através dos estômatos, mas não compromete a concentração de CO₂ no interior da folha. A hipótese de que este seria um dos principais mecanismos de aclimação ao CO₂ elevado foi rejeitada quando se comprovou que a concentração interna de CO₂ não foi alterada pela concentração externa (YELLE et al., 1989), ou seja, o aumento na diferença de concentração de CO₂ entre a atmosfera e o interior da folha compensa o aumento da resistência pelo fechamento parcial dos estômatos, mantendo-se assim a concentração interna de CO₂. Por outro lado, a baixa condutância estomática observada em altas concentrações de CO₂ atmosférico, leva a uma menor transpiração, e neste processo, com menos água sendo conduzida através do xilema, menos água é absorvida pelas raízes e conseqüentemente, menos nitrogênio é carregado pelo processo de absorção, pois a taxa de absorção de N ocorre em função da taxa de absorção de água (MALAVOLTA, 1980), podendo agravar o estado de deficiência de N.

2.4.2 Aclimação em longo prazo

Após este momento inicial, no qual os primeiros mecanismos de aclimação se desenvolvem no metabolismo, a planta inicia um segundo processo na escala de tempo de dias e semanas, denominado de aclimação em longo prazo. A aclimação em longo prazo caracteriza-se pela necessidade de um período maior de exposição ao CO₂ elevado para que as alterações no metabolismo comecem a se desenvolver (CALIMAN, 2008).

Apesar de algumas rotas metabólicas importantes serem prejudicadas no curto prazo (como a fotossíntese e a síntese de aminoácidos), a aclimação não impede que a produção de biomassa nas plantas que crescem em elevada

concentração de CO₂ seja significativamente maior do que naquelas que crescem em CO₂ ambiente. Segundo Yang et al. (2006), as plantas de arroz irrigado cultivadas em CO₂ ambiente produziram menor quantidade de biomassa total do que aquelas cultivadas em ambiente enriquecido com 200 ppm de CO₂. A razão da biomassa em CO₂ elevado/CO₂ ambiente em porcentagem (%), ou seja, a % de mudança de biomassa produzida com incremento de CO₂, variou ao longo do ciclo da cultura, com valores de 40, 30, 22, 26 e 16% para os estágios de perfilhamento, iniciação da panícula, florescimento, enchimento de grãos e maturação fisiológica, respectivamente, na média de três anos de experimentos FACE (Free-air CO₂ enrichment) (YANG et al., 2006). Percebe-se ao longo do ciclo da cultura uma tendência de decréscimo da vantagem na produção de biomassa do ambiente enriquecido de CO₂ sobre o ambiente natural, mostrando que o incremento inicial da produção de fotoassimilados não se mantém até o final do ciclo da cultura, o que indica aclimatação no longo prazo.

Além de ser reduzido ao longo do ciclo da cultura, o incremento que ocorre na produção de biomassa em ambiente enriquecido com CO₂ não é igualmente distribuído entre os diferentes compartimentos da planta, resultando, na maioria dos casos, num favorecimento da parte vegetativa em detrimento dos órgãos reprodutivos (ZISKA & BOUNCE, 2000; YANG et al., 2006). Este fato, porém, não significa que espécies que passaram por um processo de aclimatação ao CO₂ elevado terão a produtividade de grãos menor do que em ambiente natural, apenas indica que os grãos serão proporcionalmente menos favorecidos quando comparados aos caules, por exemplo, resultando em um menor índice de colheita. Para a cultura da soja (*Glycine max*), plantas crescendo em CO₂ elevado (ambiente + 300 ppm) tiveram aumentos de 57 a 154% (dependendo da cultivar) na biomassa total ao final do ciclo de desenvolvimento, comparados a apenas 25 a 78% de aumento na produtividade de grãos (ZISKA & BOUNCE, 2000), indicando que o aumento na biomassa não foi correspondente ao aumento na produtividade de grãos. A aclimatação em longo prazo, portanto, pode estar relacionada à alocação dos fotoassimilados nos órgãos reprodutivos, e isto exige uma capacidade de aumento do tamanho, ou do número destes compartimentos na planta (CALIMAN, 2008).

A capacidade de aumento dos compartimentos para alocação de fotoassimilados, ou seja, o desenvolvimento de novos drenos na planta de soja em

ambiente com elevada concentração de CO₂ (550 ppm) foi estudado por Ainsworth et al. (2004). O experimento testou duas cultivares de soja diferentes quanto ao hábito de crescimento (determinado e indeterminado), comparando-as com suas respectivas isolinhas com o hábito de crescimento alterado pela modificação de um único gene. O hábito de crescimento determinado refere-se àquelas cultivares em que o período de floração é curto e seu início coincide com o final do desenvolvimento vegetativo. Cultivares indeterminadas são aquelas que continuam o desenvolvimento vegetativo quando inicia o florescimento, permitindo um período de floração mais prolongado. Quando uma cultivar de hábito determinado é modificada para apresentar crescimento indeterminado, espera-se que o potencial produtivo se eleve, já que o período de floração será mais prolongado, podendo aumentar o número de vagens produzidas, sendo o contrário também esperado (uma cultivar indeterminada quando modificada para hábito determinado deve ter seu potencial produtivo reduzido). Os resultados de Ainsworth et al. (2004) mostram que a cultivar indeterminada teve maior capacidade fotossintética e menor acúmulo de carboidratos não estruturais, principalmente na forma de amido, do que sua isolinha determinada, indicando um desequilíbrio na relação fonte-dreno (redução do dreno) ocasionado pelo menor potencial produtivo do hábito determinado. A fotossíntese e o acúmulo de carboidratos não estruturais da cultivar de hábito determinado não apresentaram diferença significativa de sua isolinha indeterminada em elevada concentração de CO₂ (AINSWORTH et al., 2004), os autores associam este fato ao já elevado potencial produtivo da cultivar determinada utilizada e ressaltam que o efeito da aclimação é dependente da base genética de cada material.

Plantas de arroz irrigado submetidas a elevadas concentrações de CO₂ foram avaliadas quanto à distribuição da biomassa produzida entre os diferentes compartimentos da planta: folhas colmos e panículas, em diferentes estágios de desenvolvimento ao longo do ciclo (YANG et al., 2006). A Figura 5 foi construída a partir dos dados médios extraídos da Tabela 3 do trabalho de Yang et al. (2006) e mostra a porcentagem de mudança ocorrida na distribuição da biomassa na planta em função da maior concentração de CO₂ em um experimento FACE conduzido na China durante 3 estações de cultivo. Os resultados de Yang et al. (2006) indicam que, comparativamente ao ambiente natural, em maiores concentrações de CO₂ na atmosfera uma fração menor da biomassa produzida foi alocada nas folhas, com um

aumento na fração alocada nos colmos (Figura 5). Proporcionalmente, a planta de arroz produziu maior quantidade de colmos do que folhas, sugerindo que em ambiente enriquecido com CO₂ o aumento da taxa fotossintética resultou em maior acúmulo de biomassa nos órgãos de reserva. O maior incremento de biomassa nos órgãos de reserva em relação às folhas é um indicativo de que ocorre um desequilíbrio na relação fonte-dreno e, neste caso, a alta taxa fotossintética resulta na produção de um número elevado de cadeias carbonadas, as quais o vegetal não consegue metabolizar totalmente e acabam sendo destinadas aos órgãos de reserva.

Os grãos, assim como os colmos, também são órgãos de reserva, porém, os resultados de Yang et al. (2006) indicam uma tendência diferente dos colmos para o acúmulo de biomassa nos grãos de arroz. Em um primeiro momento, no aparecimento da panícula (estágio 3), a fração de biomassa destinada aos grãos é proporcionalmente menor no ambiente enriquecido com CO₂ (Figura 5), pois neste momento os colmos ainda são drenos mais fortes que os grãos, recebendo a maior fração dos fotoassimilados produzidos (YANG et al., 2006). Durante o enchimento de grãos (estágio 4) a panícula do arroz passa a ter prioridade na partição de fotoassimilados e este órgão é favorecido pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera.

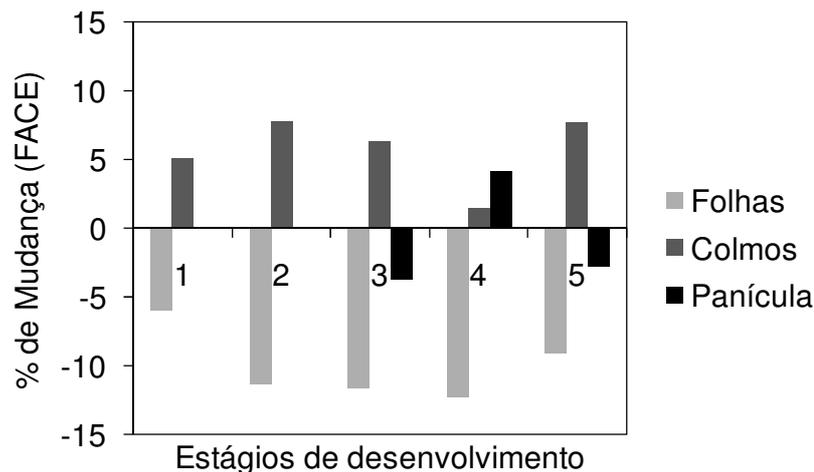


Figura 5. Porcentagem de mudança na distribuição da biomassa para os principais compartimentos da planta de arroz em ambiente enriquecido com CO₂ (FACE), em relação ao CO₂ ambiente, com avaliações em diferentes estágios de desenvolvimento.

Estágios de desenvolvimento: 1 (perfilhamento), 2 (iniciação floral), 3 (aparecimento da panícula), 4 (enchimento de grãos) e 5 (maturidade fisiológica). Adaptado de Yang et al. (2006).

O excedente de produtos da fotossíntese em ambiente enriquecido com CO₂ é portanto alocado nos órgãos de armazenamento de reservas do arroz (colmos e grãos), aumentando o potencial produtivo da cultura. No entanto, a planta de arroz possui uma característica morfológica que limita o potencial produtivo e resulta na redução da vantagem da partição de biomassa para a panícula em ambiente enriquecido com CO₂ no estágio de maturação fisiológica, como pode ser observado na Figura 5. A panícula do arroz é composta por espiguetas (que darão origem aos grãos), cada espiguetas é formada por involúcros externos chamados de lema e pálea, que serão a casca do grão. No processo de enchimento dos grãos de arroz, a lema e a pálea servem como limitadores do crescimento do grão, por serem estruturas rígidas, fazendo com que o tamanho e peso dos grãos de um determinado material de arroz apresentem variabilidade muito pequena (CAMARGO et al., 2008; LARROSA et al., 2009). Em ambiente enriquecido com CO₂ a maior produção de fotoassimilados favoreceu a produtividade final de grãos de arroz (YANG et al., 2006), porém, o potencial produtivo poderia ser ainda maior se não ocorresse a aclimatação. Nesta espécie vegetal um dos mecanismos de aclimatação no longo prazo é a limitação do dreno, pela barreira física que a lema e a pálea representam para o crescimento dos grãos, assim, os fotoassimilados remanescentes são direcionados para os colmos, aumentando novamente a porcentagem de mudança deste compartimento no ambiente enriquecido com CO₂ (Figura 5).

2.5 Modelagem matemática

Análises de impacto do tempo meteorológico e do clima sobre a agricultura, durante longas séries de anos, são importantes nos níveis regional, estadual e nacional, por seu impacto social e econômico. No entanto, estudos do impacto da mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas são difíceis de serem realizados experimentalmente, devido à limitação de equipamentos, mão-de-obra e recursos financeiros (ANDRESEN et al., 2001). Além disso, há dificuldade no controle de alguns fatores em experimentos e as respostas das plantas são afetadas

por condições meteorológicas que variam no espaço e no tempo, ou seja, são diferentes de um local para outro e, em um mesmo local, variam a cada dia.

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que nos permitem descrever as complexas interações que existem em agroecossistemas e, assim, tornam possível o estudo do impacto de mudanças nos elementos meteorológicos e no clima sobre os agroecossistemas. Existem vários modelos de simulação de rendimento das culturas agrícolas disponíveis na bibliografia, desde os mecanísticos de elevada complexidade e número de coeficientes (STAPPER & HARRIS, 1989) até modelos empíricos simples (MONTEITH & SCOTT, 1982). Os modelos matemáticos devidamente adaptados e testados em diferentes ambientes são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta ou cultura e o ambiente, e podem ser usados em estudos dos efeitos de possíveis mudanças climáticas em atividades agrícolas. Existem vários modelos de simulação da produtividade de grãos de arroz, alguns mais complexos como o CERES-rice (SINGH et al., 1993) e o ORYZA1 (KROPFF et al., 1994), e outros com algumas simplificações, principalmente na maneira de calcular a produção de matéria seca na planta, que facilitam sua utilização, como o InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006), o WARM (CONFALONIERI et al., 2009) e o SimulArroz (STRECK et al., 2013a).

Estudos do impacto das mudanças climáticas na agricultura do Brasil têm aumentado nos últimos anos e estimativas de rendimento através de modelos matemáticos têm sido obtidas em diversas regiões para diferentes culturas (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001; STRECK & ALBERTO, 2006a,b; LAGO et al., 2008; STRECK et al., 2008; WALTER et al., 2010; STRECK et al., 2013a,b). Para as culturas de trigo, soja e milho, Siqueira et al. (2000) realizaram uma simulação através da modelagem para diferentes regiões do país, encontrando redução de 31% e 16% na produção de trigo e milho, respectivamente, projetada para o ano de 2050 aproximadamente, e para a cultura da soja simularam um aumento na produção de grãos em torno de 27%. Para a região de Santa Maria, RS, Streck & Alberto (2006b) realizaram um estudo do impacto do possível aquecimento global e concluíram que a mudança climática projetada pela simulação para os próximos 100 anos influenciará na produtividade destas culturas. Segundo os últimos autores, o aumento de 2, 3 e 6°C na temperatura do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ na produtividade das culturas de trigo, soja e milho, respectivamente.

Para a cultura do arroz irrigado, Lago et al. (2008) simulou o desenvolvimento vegetativo em Santa Maria, RS, e encontrou que a duração da fase vegetativa, em geral, diminuiu com o aumento da temperatura em cenários de mudança climática. A produtividade de grãos de arroz irrigado foi simulada para Santa Maria, na região da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, utilizando o modelo InfoCrop, onde concluiu-se que a produtividade potencial deverá aumentar em cenários climáticos futuros (WALTER et al., 2010).

Apesar de ser o maior produtor de arroz fora da Ásia (USDA, 2013), no Brasil ainda existem poucos trabalhos de pesquisa referentes à influência da mudança climática na cultura do arroz. Alguns fatores contribuem para esta situação, como: necessidade de altos investimentos em pesquisas de campo, poucos pesquisadores dominarem a modelagem e pelo interesse relativamente novo por esta linha de pesquisa no Brasil. Apesar dos modelos matemáticos serem uma simplificação da realidade, podem ser uma ferramenta útil para estimativa da produtividade das culturas agrícolas e da emissão de gases de efeito estufa por agroecossistemas em cenários de mudança climática, em função do baixo custo envolvido nestes estudos de simulação e pelos resultados satisfatórios que os modelos existentes vem apresentando em diferentes locais do planeta. Neste sentido, os resultados de estudos numéricos com modelos matemáticos constituem contribuições importantes do ponto de vista científico, pois possibilitam simular a resposta de agroecossistemas em cenários futuros com baixo custo e confiabilidade satisfatória.

2.6 O modelo SimulArroz

O SimulArroz é um modelo ecofisiológico dinâmico baseado em processos (*process-based model*), desenvolvido pelo Grupo de Agrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria, para simular a produtividade de arroz irrigado no sistema por inundação (*flooded rice*) no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (STRECK et al., 2013a). O SimulArroz é resultado de dois modelos anteriores de arroz, o ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2004), que é o modelo de simulação da cultura do arroz do Instituto Internacional de Pesquisa em Arroz (IRRI - *The International Rice Research Institute*), nas Filipinas, e o InfoCrop (AGGARWAL et al.,

2006), ambos simuladores de arroz desenvolvidos e testados em ecossistemas de arroz na Ásia. Parte do código fonte do ORYZA2000 e do InfoCrop foi utilizado no software do SimulArroz e o restante do código fonte foi desenvolvido para adaptar o modelo para as cultivares de arroz e as condições de cultivo do Rio Grande do Sul (WALTER et al., 2012), o que diferencia o SimulArroz dos outros simuladores. É, portanto, um produto para atender as demandas de simulação numérica regional para os ecossistemas gaúchos de arroz, ou seja, arroz em sistema de inundação do solo (alagamento) e com cultivares de arroz adaptadas para condições de cultivo no estado do Rio Grande do Sul (STRECK et al., 2013a).

O SimulArroz calcula os principais processos ecofisiológicos de um ecossistema de arroz, como a acumulação de biomassa de raízes, folhas, caule e panículas, o desenvolvimento da cultura (fenologia pela escala de COUNCE et al., 2000) e a emissão de folhas (escala de HAUN, 1973) no passo de tempo de um dia. Em sua versão 1.0 o software estima a produtividade potencial da cultura, e a produtividade em três níveis tecnológicos da lavoura (alto, médio e baixo). O efeito da concentração de CO₂ atmosférico sobre o crescimento da planta de arroz é descrito através de uma função de resposta da Eficiência do Uso de Radiação à concentração de CO₂ atmosférico (STRECK et al., 2012). Em regiões extratropicais, como é o caso do estado do Rio Grande do Sul, as temperaturas invernais são limitantes para a planta de arroz. No SimulArroz, a cultura do arroz morre devido a danos causados pelo frio quando a temperatura média diária do ar (média entre a temperatura mínima e a máxima diária) é menor do que 12°C durante quatro dias consecutivos (danos por geada).

O modelo permite ao usuário optar por um nível tecnológico da lavoura, entre as opções: potencial, alto, médio e baixo. O nível tecnológico potencial simula a produtividade potencial (teto produtivo), situação que geralmente só se consegue em nível experimental, com pequenas parcelas, onde as plantas não sofrem nenhum estresse biótico (pragas, doenças e plantas daninhas) ou abiótico (falta de água e nutrientes), não acamam e estão na densidade populacional recomendada (CASSMAN et al., 2003). O nível tecnológico alto representa lavouras bem manejadas e que se enquadram na proposta do Projeto 10 do IRGA (MENEZES et al., 2004). O nível baixo representa lavouras com pouca tecnologia de insumos, as plantas sofrem com estresse por fatores bióticos (pragas, doenças e alta competição com plantas daninhas) e abióticos (adubação de NPK não é feita ou é feita com

baixa quantidade, falta água durante as fases críticas) a ponto da lavoura comercial não ser viável economicamente no Rio Grande do Sul. O nível tecnológico médio representa lavouras com uma tecnologia intermediária entre os níveis alto e baixo (Figura 6).

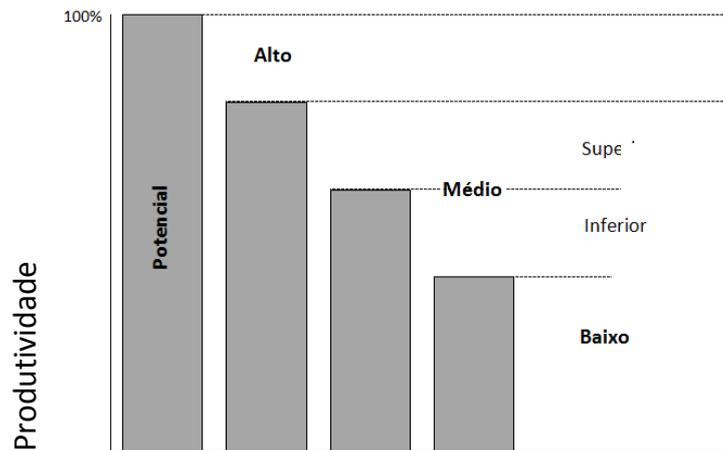


Figura 6. Níveis de tecnologia considerados no modelo SimulArroz.

Fonte: Streck et al., 2013a.

O desempenho da simulação de produção de biomassa pelo modelo SimulArroz na região central do Rio Grande do Sul foi testado por Rosa (2013), através de comparações entre dados observados à campo e dados simulados pelo modelo. O modelo SimulArroz estimou com precisão adequada a produção de biomassa de diferentes cultivares e datas de semeadura de arroz na região central do Rio Grande do Sul. Rosa (2013) ainda avaliou a sensibilidade da simulação da produtividade de grãos do modelo em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul em diferentes anos agrícolas, datas de semeadura e com cultivares distintas, verificando que o mesmo capturou a variação do rendimento de grãos de arroz em diferentes experimentos realizados nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Os erros médios de produtividade para as regiões foram de aproximadamente 1500 Mg ha⁻¹, podendo ser considerados baixos, uma vez que há muitas variáveis que influenciam a produtividade, sendo que muitas não foram consideradas no modelo.

O software do modelo SimulArroz está disponível para download no sitio oficial do SimulArroz (www.ufsm.br/simularroz), sendo uma ferramenta que pode auxiliar no estudo do impacto de cenários de mudança climática sobre a cultura do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul. O RS é um importante produtor de

arroz no país, portanto, possíveis impactos de mudanças climáticas nesta cultura podem afetar de maneira significativa a cadeia produtiva, sendo que estudos sobre o tema auxiliam na tomada de decisões para pesquisas e safras futuras.

2.7 Cenários climáticos e incertezas

Os modelos matemáticos, por mais complexos que sejam, sempre apresentam um grau de incerteza. Segundo Nobre et al. (2008) podemos citar duas grandes fontes de incertezas no uso de modelos matemáticos. A primeira se deve à dependência de ações humanas na trajetória das emissões de gases de efeito estufa, a segunda é referente ao fato de que modelos serem simplificações imperfeitas da realidade e diferentes modelos climáticos, por exemplo, podem apresentar estimativas bastantes distintas em suas projeções do clima futuro (NOBRE et al., 2008). Os relatórios publicados periodicamente pelo IPCC, embora estejam repletos de incertezas quanto à magnitude das mudanças, são uma importante fonte de informações a respeito da mudança climática e os cenários futuros. As incertezas decorrem do fato de o sistema climático-atmosférico ser bastante complexo e com características não lineares, dificultando a precisão de modelos matemáticos, principalmente quando as estimativas são de muito longo prazo (AÍMOLA e DIAS, 2007). Espera-se que, com o avanço do conhecimento científico e das pesquisas nesta área as incertezas diminuam sistematicamente (AÍMOLA e DIAS, 2007; NOBRE et al., 2008). Os resultados deste trabalho de simulação também estão sujeitos a inúmeras incertezas e críticas, no entanto servem de indicativo sob os impactos da mudança climática sob a cultura do arroz, além de ser fonte de informações para os avanços na pesquisa e melhoramento genético.

3 METODOLOGIA

Este estudo numérico foi realizado para a área orizícola do estado do Rio Grande do Sul. O estado foi dividido em seis regiões produtoras de arroz definidas pelo Instituto Riograndense do arroz (IRGA, 2005): Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos, Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul (Figura 7).

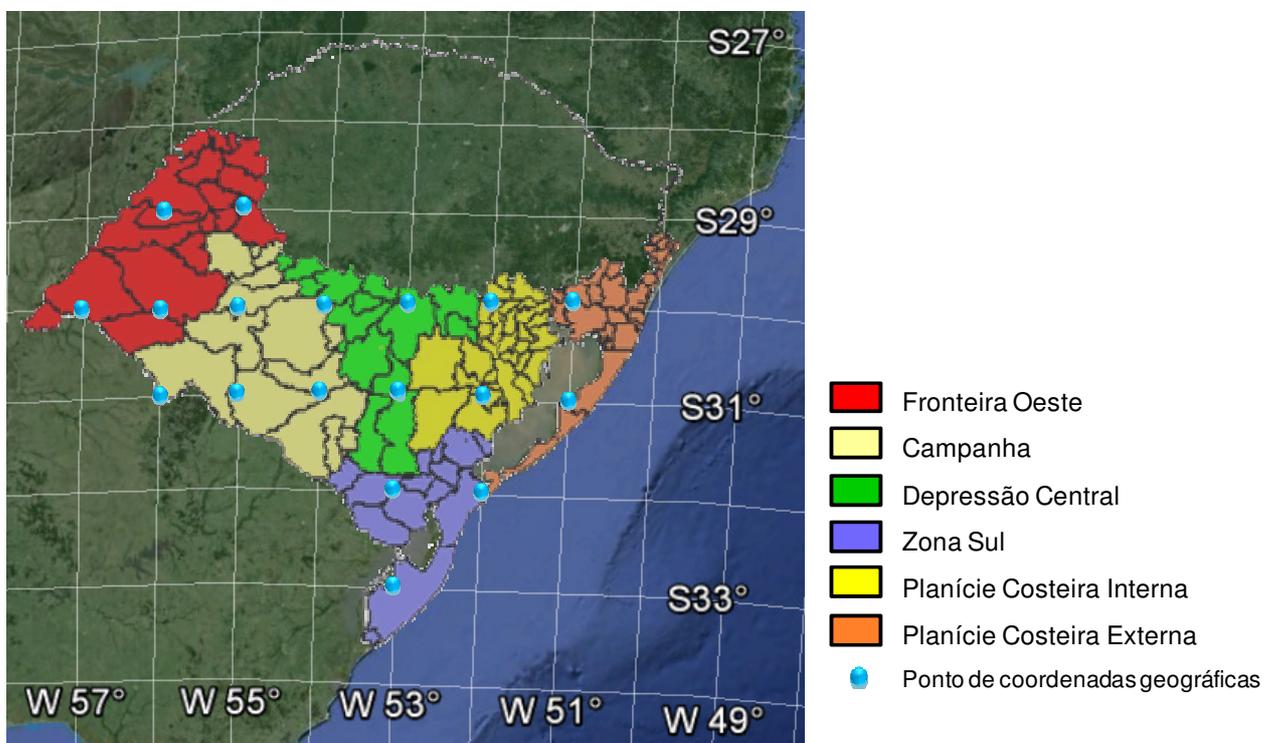


Figura 7. Regiões orizícolas do estado do RS.

Modificado de Google Earth e IRGA.

3.1 Cenário climático

O cenário de mudança climática utilizado neste estudo foi baseado no cenário A1B do Quarto relatório do IPCC (IPCC, 2007). Este cenário considera mudanças na temperatura do ar, radiação solar e concentração de CO₂ na atmosfera e foi gerado pelo Grupo de Clima da UFSM – GPC para o período presente (1960-2000) e

período futuro (2001 – 2100). Para gerar os dados do cenário foi usado o Modelo Climático Regional ICTP (International Centre for Theoretical Physics) – RegCM3 fazendo uma regionalização (downscaling dinâmico). As condições de contorno e CO₂ são as da Rodada do ECHAM5 apresentadas no 4º relatório do IPCC de 2007. O cenário de emissão é o A1B, intermediário entre o mais pessimista e o mais otimista.

O contexto e a família de cenários A1 do IPCC (2007) descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são a convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda *per capita*. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1FI), fontes energéticas não-fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B). No cenário A1B o equilíbrio é definido como não depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final (IPCC, 2007). A opção pelo cenário A1B foi com base naquilo que mais se acredita de como a população brasileira e mundial se comportará no futuro.

O cenário utilizado é composto por dados de temperatura mínima e máxima diária do ar, radiação solar diária e concentração anual de CO₂ no período de 1960 a 2099 (140 anos). Esta série de dados foi agrupada em quatro intervalos eqüidistantes, cada um com 35 anos, a fim de criar períodos que representassem o clima passado (de 1960 a 1994, ano médio: 1977), o clima atual (de 1995 a 2029, ano médio: 2012) e dois períodos do clima futuro: em meados do século XXI (2030 a 2064, ano médio: 2047) e ao final do século (2065 a 2099, ano médio: 2082). Os dados meteorológicos referentes ao cenário climático cobrem toda a região orizícola do estado, através de pontos de coordenadas geográficas espaçadas de 1 em 1 grau de latitude e longitude (Figura 7), totalizando 18 pontos em todo o estado. Cada ponto do mapa foi representado por um conjunto de dados meteorológicos criados a partir do cenário climático utilizado.

A caracterização do cenário A1B foi feita através do cálculo da média mensal dos dados meteorológicos para a reprodução da curva anual de temperatura e de radiação solar em diferentes períodos de tempo, para cada uma das seis regiões orizícolas do estado. A evolução da concentração de CO₂ atmosférico também foi representada graficamente ao longo dos anos do cenário climático.

3.2 Descrição do modelo

O modelo de simulação de arroz usado neste estudo é o SimulArroz (Figura 8), um modelo de simulação dinâmico, que pode ser utilizado para diversos fins, inclusive a simulação dos efeitos de possíveis mudanças climáticas sobre a produtividade de grãos das culturas agrícolas (STRECK et al., 2013a). Uma versão preliminar deste mesmo modelo foi calibrada para simular a produtividade de grãos de arroz irrigado no município de Santa Maria, na região da Depressão Central do estado, em uma condição de produção potencial (WALTER et al., 2012) e também foi usado na estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado em cenários sintéticos de mudança climática (WALTER et al., 2010). O modelo SimulArroz foi desenvolvido e avaliado para as condições das regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul e cultivares locais (ROSA, 2013).

O SimulArroz necessita apenas de um conjunto de dados meteorológicos contendo temperatura mínima e máxima diária do ar e radiação solar diária, para que seja realizada uma simulação. O usuário deve inserir os dados meteorológicos e informar os dados referentes à cultura do arroz na tela inicial do software: cultivares ou grupo de maturação, nível tecnológico da lavoura, data de semeadura, número de safras a serem simuladas, concentração de CO₂ atmosférico e densidade de plantas (Figura 8). Após cada simulação, os resultados podem ser visualizados na forma gráfica, ou resultados numéricos. Estes dados são armazenados pelo programa para utilização em outro momento, se necessário.

Figura 8. Tela inicial do software SimulArroz.

O modelo simula o desenvolvimento do arroz irrigado através da soma térmica diária, dividindo o ciclo da cultura em quatro fases (LAGO, 2008; STRECK et al., 2011): fase de emergência (da semente a emergência), fase vegetativa (emergência-diferenciação do primórdio floral), fase reprodutiva (diferenciação do primórdio floral-antese) e fase de enchimento de grãos (antese-maturidade fisiológica), representadas na Figura 9. A soma térmica necessária para completar cada fase é dependente da cultivar (WALTER et al., 2012), sendo calculada com base nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar e considerando temperaturas cardinais variáveis ao longo do ciclo de desenvolvimento, de acordo com metodologia descrita por Lago (2008) e Streck et al. (2011).

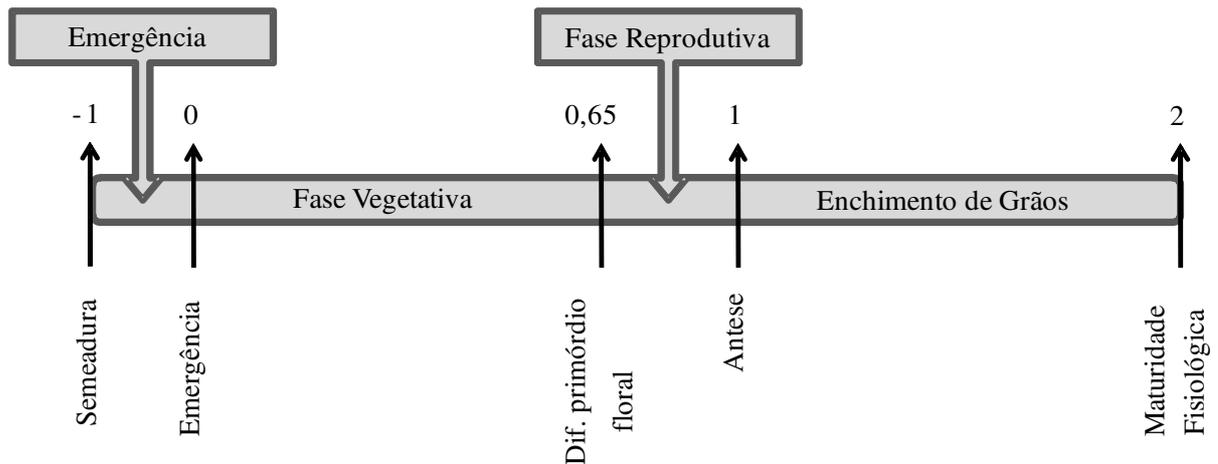


Figura 9. Diagrama esquemático do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz irrigado no modelo SimulArroz, indicando os principais estágios de desenvolvimento em cada fase.

Fonte: Walter et al., 2012.

A produção de matéria seca (MS) na planta de arroz é calculada no SimulArroz a partir da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) e do Índice de Área Foliar (IAF), uma relação clássica e robusta em estudos ecofisiológicos. O valor de EUR utilizado no modelo é de $2,39 \text{ g MJ}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada pelo dossel (KINIRY et al., 2001), utilizou-se $\text{RFA} = 50\%$ da densidade de fluxo de radiação solar global incidente, em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, a qual foi calculada a partir do brilho solar pela equação de Angstron, modificada por Prescott e Penman (ESTEFANEL et al. 1990). O coeficiente de extinção das folhas (KDF) à radiação solar é de 0,4 até a antese, e 0,6 após a antese (Bouman et al., 2004). A equação que estima a produção diária de biomassa foi descrita por Aggarwal et al. (2007):

$$\text{MS (g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}) = \text{EUR} * \text{RFA} * (1,0 - \text{EXP} (-\text{KDF} * \text{IAF})) \quad (1)$$

Os níveis tecnológicos da lavoura são definidos por uma penalização sobre a EUR. Esta maneira de incluir no modelo os níveis tecnológicos da lavoura usa o pressuposto ecofisiológico de que qualquer estresse (biótico ou abiótico) reduz a capacidade fotossintética do dossel e, portanto, diminui a eficiência de transformar a radiação solar interceptada em biomassa pelo dossel vegetal. O efeito da temperatura sobre a EUR é descrito por uma função de resposta com quatro temperaturas cardinais descrita por Soltani et al. (2001) e representada na Figura 10. Com esta função, a EUR é máxima quando a temperatura média diária do ar se situa

na faixa ótima (entre 22 e 32 °C) e é multiplicada por um fator de correção menor que 1 em temperaturas sub e supra ótimas, o que reduz a EUR (Figura 10).

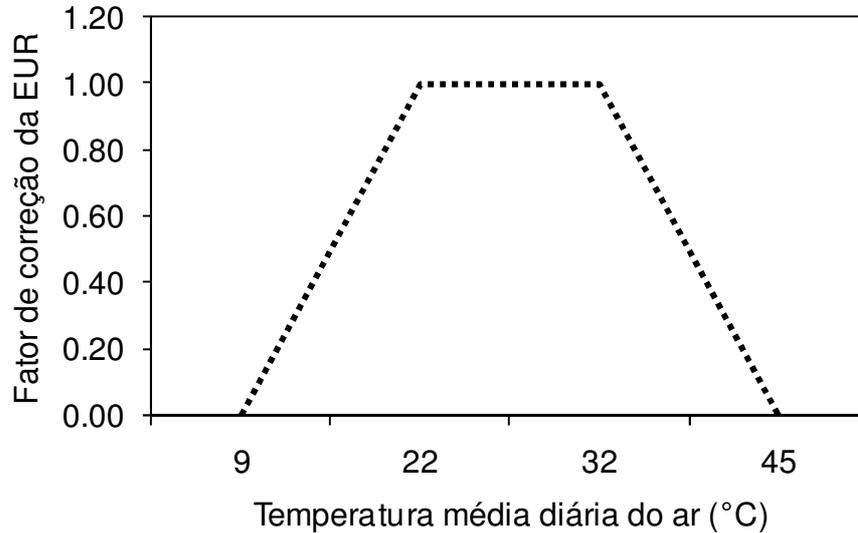


Figura 10. Função de resposta da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) à temperatura média diária do ar usada no SimulArroz.

Fonte: Walter et al., 2012.

Após o cálculo da produção diária de matéria seca na planta, o modelo determina a partição desta entre os diferentes órgãos da planta, de acordo com a fase de desenvolvimento (BOUMAN et al., 2004). A massa seca alocada nas folhas, multiplicada pela área foliar específica, define o índice de área foliar da cultura, que é atualizado diariamente no cálculo da produção de matéria seca. O valor de 7,5 foi definido como IAF máximo para a cultura no modelo SimulArroz (WALTER et al., 2012), valor que corresponde a condições ótimas de crescimento e desenvolvimento para o arroz irrigado no estado. Esta limitação no índice de área foliar é uma maneira de o modelo considerar a aclimatação ao CO₂ elevado, visto que a produção diária de matéria seca depende do índice de área foliar, seu valor máximo pré-definido simula uma limitação física de aumento exagerado da taxa de crescimento da cultura em condições de CO₂ elevado. Esta limitação no modelo corresponde ao que foi descrito anteriormente como aclimatação no curto prazo, quando ajustes bioquímicos e fisiológicos são observados em função da saturação ou esgotamento do metabolismo fotossintético das plantas expostas ao CO₂ elevado.

O efeito da concentração de CO₂ atmosférico sobre o crescimento da planta

de arroz é descrito no modelo SimulArroz através de uma função de resposta da Eficiência do Uso de Radiação à concentração de CO₂ atmosférico definida por Streck et al. (2012) como:

$$Y = \frac{3.096 \times 10^{23} + 1.4382 \times [CO_2]^{0.378}}{3.096 \times 10^{23} + [CO_2]^{0.378}} \quad (2)$$

em que Y é a função resposta que multiplica a EUR. A representação gráfica da função de resposta de EUR ao aumento de CO₂ está na Figura 11.

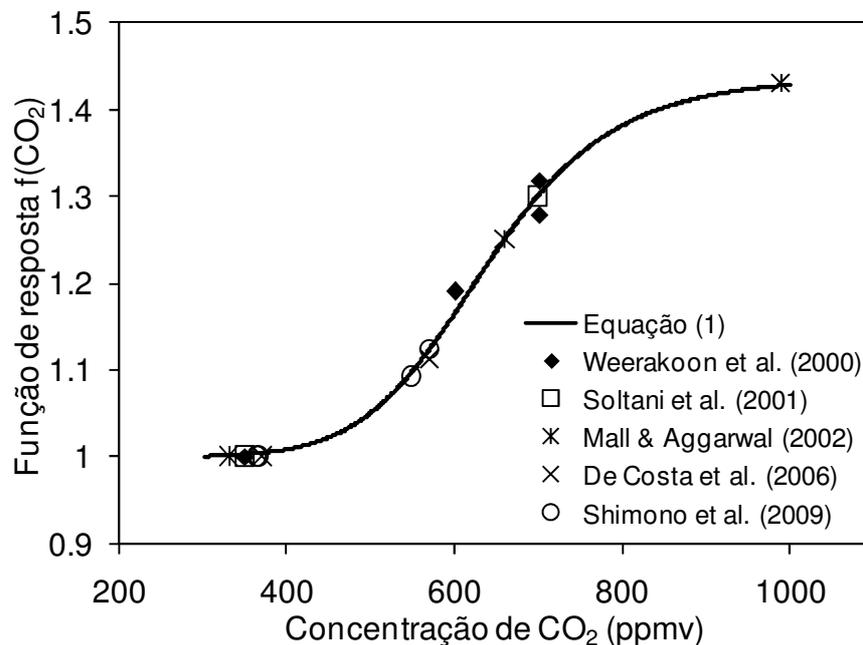


Figura 11. Função de resposta da eficiência de uso da radiação ao aumento de CO₂ atmosférico usado no SimulArroz.

Fonte: Streck et al., 2012.

O potencial produtivo da cultura é dependente da disponibilidade de radiação solar no período de pré-floração, sendo afetado por condições de temperaturas extremas, que causam esterilidade de espiguetas, ou, apenas no caso de temperaturas muito baixas, morte das plantas por geada. Estes danos são contabilizados pelo software SimulArroz e ajudam a explicar as variações da produtividade de grãos nas diferentes situações simuladas.

O número de espiguetas formadas em um dia é calculado por um fator de formação de espiguetas (número de espiguetas por grama de matéria seca) em função da matéria seca produzida naquele dia ($g\ m^{-2}\ dia^{-1}$), resultando em espiguetas $m^{-2}\ dia^{-1}$. Este valor é acumulado desde a diferenciação do primórdio

floral até a antese, resultando no número total de espiguetas formadas por metro quadrado. O número final de espiguetas formado sofre uma correção em função da esterilidade das espiguetas causada por temperaturas extremas, tanto muito baixas (esterilidade por frio), quanto muito altas (esterilidade por calor), no período crítico. O período crítico ocorre próximo à floração, ou antese, da planta de arroz (estágio 1, representado na Figura 9), sendo que o modelo considera como crítico o período entre os estágios 0,75 e 1,2 para as temperaturas baixas (temperatura média menor que 22°C) e entre os estágios de 0,96 e 1,22 para as temperaturas elevadas (temperatura máxima acima de 35°C), como no ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2004). A esterilidade de espiguetas por frio (Sc) e a esterilidade de espiguetas por calor (Sh) são dadas pela porcentagem de espiguetas que foram danificadas pelas temperaturas extremas no período pré e pós-antese, conforme as equações (BOUMAN et al., 2004):

$$Sc = \frac{1 - (4,6 + 0,054 \times (\sum (22 - Td))^{1,56})}{100} \quad (3)$$

$$Sh = \frac{1}{1 + e^{(0,882 \times (Tdm - 35,6))}} \quad (4)$$

em que, Td é a temperatura média diária (somatório de $[22 - Td]$ no período crítico), Tdm é a temperatura máxima diária (média do período crítico).

Em regiões extratropicais, como é o caso do estado do Rio Grande do Sul, as temperaturas inverniais são limitantes para a planta de arroz. No SimulArroz, a cultura do arroz morre por geada quando a temperatura média diária do ar (média entre a temperatura mínima e a máxima diária) é menor do que 12°C durante quatro dias consecutivos. Esta condição para morte da cultura por geada é a mesma do ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2004). Quando a condição de dano por geada é satisfeita, o modelo SimulArroz considera que toda a lavoura naquela condição foi perdida, fazendo com que a produtividade daquele ano seja zero. Para contabilizar este dano considerou-se o número de safras de cada período de tempo do cenário climático (35 anos) em relação ao número de safras perdidas por geada, calculando-se a porcentagem de safras perdidas em cada período. A porcentagem de espiguetas estéreis e os danos causados por geada em cada situação simulada

foram representados na forma de gráficos de barras, da mesma forma que o potencial produtivo da cultura, a fim de possibilitar a discussão destes resultados.

A partir da antese, parte da matéria seca produzida é translocada diariamente para a panícula, dando início ao enchimento dos grãos. A fração da matéria seca que é destinada à panícula é dividida entre as espiguetas produzidas. Após o período crítico de sensibilidade às temperaturas extremas (estágio 1,2), o número total de grãos é corrigido em função da esterilidade de espiguetas, sendo que a matéria seca que havia sido alocada nos grãos que sofreram a esterilidade é perdida. Em adição à matéria seca produzida diariamente, após a antese 10% das reservas previamente acumuladas no colmo é translocada para os grãos, todos os dias.

Quando um quarto do período de enchimento de grãos é completado, a massa seca dos grãos é avaliada no modelo. Se o peso de cada grão for menor que um quarto do peso potencial de um grão ($0,0249 \text{ g grão}^{-1}$), o número total de grãos é reduzido redistribuindo-se a matéria seca, com o objetivo de que cada grão tenha um quarto do seu peso potencial. Este procedimento, apesar de reduzir o número de grãos produzidos pela cultura, não altera o rendimento final, pois é apenas uma redistribuição da matéria seca nos grãos. Esta é a maneira de controlar, no modelo, o peso individual dos grãos, um componente do rendimento da cultura do arroz que apresenta pouca variabilidade.

Desta forma é contemplada no modelo a aclimatação no longo prazo, que está relacionada à capacidade da planta em aumentar ou desenvolver novos drenos para os fotoassimilados produzidos. Por suas características morfológicas o grão de arroz apresenta pouca variabilidade de tamanho, para simular esta particularidade o modelo considera o peso máximo para um grão de $0,0249 \text{ g}$ (BOUMAN et al., 2004). Quando todos os grãos atingem o peso máximo a simulação chega ao final, mesmo que o estágio de maturidade fisiológica ainda não tenha sido atingido, mantendo a característica de tamanho pouco variável dos grãos de arroz. Este procedimento faz com que o índice de colheita seja menor em ambiente enriquecido com CO_2 , pois o aumento de biomassa total produzida não é proporcional ao aumento no rendimento de grãos, pela limitação de dreno, caracterizando a aclimatação no longo prazo.

3.3 Rodadas do modelo SimulArroz

A produtividade de grãos de arroz foi estimada rodando-se o modelo SimulArroz com os dados do cenário A1B. Na simulação foram considerados três grupos de maturação de arroz: precoce, médio e tardio, que correspondem aos grupos II, III e IV do Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2013/2014 (BRASIL, 2013). As simulações foram feitas para quatro níveis tecnológicos da lavoura (potencial, alto, médio e baixo) em sete datas de semeadura, de agosto a fevereiro com intervalo de um mês entre as datas (01/08, 01/09, 01/10, 01/11, 01/12, 01/01, 01/02), totalizando 84 rodadas do modelo para cada ano do cenário climático, em cada ponto de coordenadas geográficas.

Em cada série de dados de produtividade gerada através das rodadas do modelo ao longo dos anos do cenário climático (1960 a 2099), calculou-se a tendência, através da análise do coeficiente angular da regressão linear entre produtividade x anos, para cada ponto de grade. Com isso foi gerado um mapa das tendências, indicando a tendência da produtividade de arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas do estado.

Foram calculadas as médias de produtividade potencial de grãos a 13% de umidade do grão, número de espiguetas produzidas, esterilidade por frio e por calor, para todo o estado, e para cada região orizícola, (média dos grupos de maturação e níveis tecnológicos) em cada período de tempo. Para o cálculo das médias de cada região, não foram considerados aqueles pontos marginais, ou muito próximos do limite de transição entre uma região e outra, para que as diferenças entre as regiões fossem preconizadas.

Para a representação cartográfica foi criada uma máscara para o estado do Rio Grande do Sul utilizando o programa GRADS. Os mapas gerados indicam a produtividade potencial de grãos de arroz irrigado com 13% de umidade na região orizícola do estado do RS, em diferentes datas de semeadura, para o cenário A1B.

Os grupos de maturação e os níveis tecnológicos da lavoura foram avaliados através da comparação entre a produtividade de grãos no período atual (1995 a 2029) e a anomalia verificada ao final do século XXI (2065 a 2099), em relação ao período atual. Para cada grupo de maturação (precoce, médio, tardio) e cada nível

tecnológico (alto, médio, baixo) calculou-se a média da produtividade de grãos nas datas que compreendem o período recomendado para a semeadura no estado, e representou-se em mapas a produtividade nos períodos considerados como clima atual do cenário A1B e a anomalia até o final do século.

3.4 Correção da tendência tecnológica

Os dados simulados para cada região orizícola do estado entre as safras de 1984/85 e 2013/14 foram comparados com dados observados das regiões no mesmo período, cedidos pelo IRGA. A série de dados simulados refere-se à média da produtividade de grãos dos três grupos de maturação no período recomendado para a semeadura no estado, no nível tecnológico médio, que mais se assemelha com a condição de manejo das lavouras do estado. Para tal comparação os dados observados foram submetidos a uma correção da tendência tecnológica (Figura 12) segundo a equação:

$$y_n + \Delta y = y_n + (y_U - y_{xn}) \quad (5)$$

em que: $y_n + \Delta y$ é a correção dos dados observados originais, y_n são os valores observados, onde n é cada um dos anos da série, variando de 1 a 29, y_U refere-se ao último dado de produtividade da série e y_{xn} é o valor da produtividade (y) quando x é igual a n na equação da tendência polinomial da série de dados.

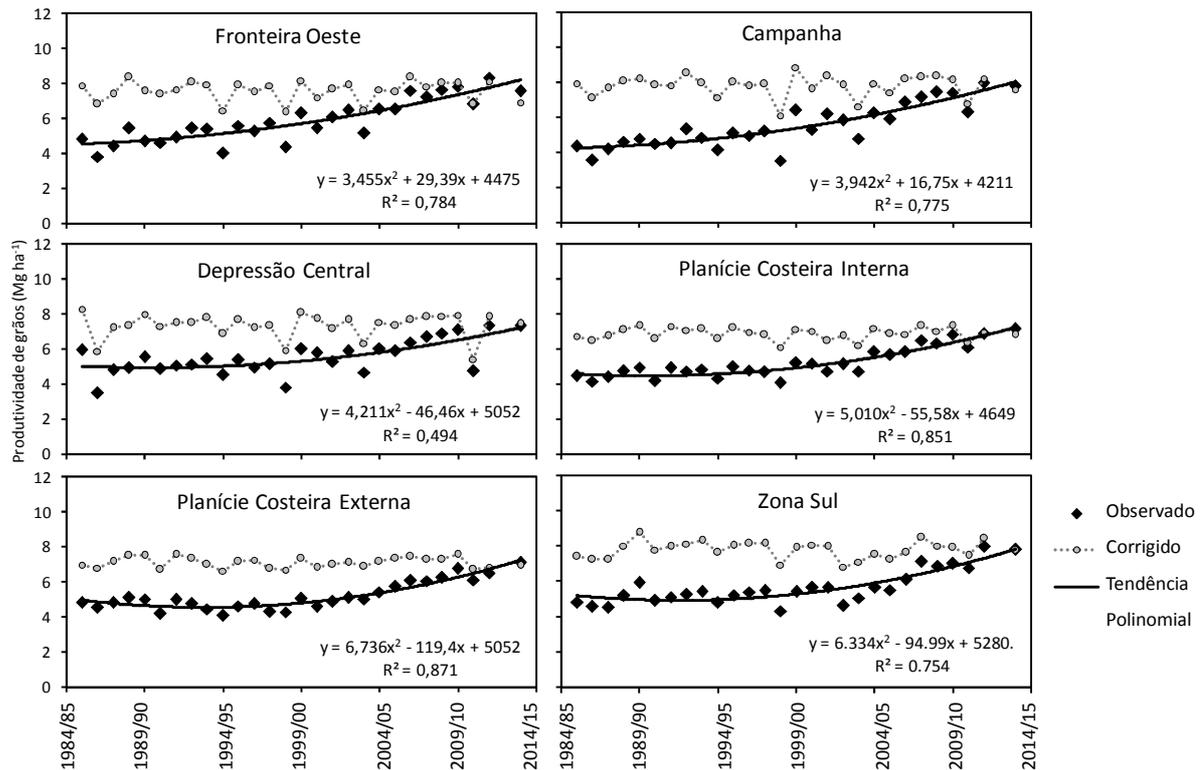


Figura 12. Correção da tendência tecnológica da produtividade de grãos de arroz irrigado nas regiões orizícolas do estado do RS, na série histórica 1994/95 – 2012/13.

A tendência tecnológica das séries de dados de produtividade de arroz irrigado refere-se ao avanço das tecnologias utilizadas nas lavouras do estado ao longo dos anos, como novas cultivares, práticas de manejo, etc., resultando em incremento da produtividade de grãos, independentemente das variáveis meteorológicas (KLERING et al., 2008). A correção desta tendência se faz necessária na série de dados observados, uma vez que os dados simulados consideram as práticas atuais de manejo e cultivares modernas na simulação. Assim, a tendência polinomial dos dados observados é corrigida de acordo com o último valor de produtividade de grãos da série (Equação 5), fazendo com que toda a série corrigida se eleve até o patamar do último ano, mas mantendo a variabilidade original entre os anos da série (Figura 12).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução da concentração de CO₂ e das variáveis meteorológicas no cenário A1B e que afetam o crescimento e o desenvolvimento da cultura do arroz no modelo SimulArroz estão nas Figuras 13 a 16.

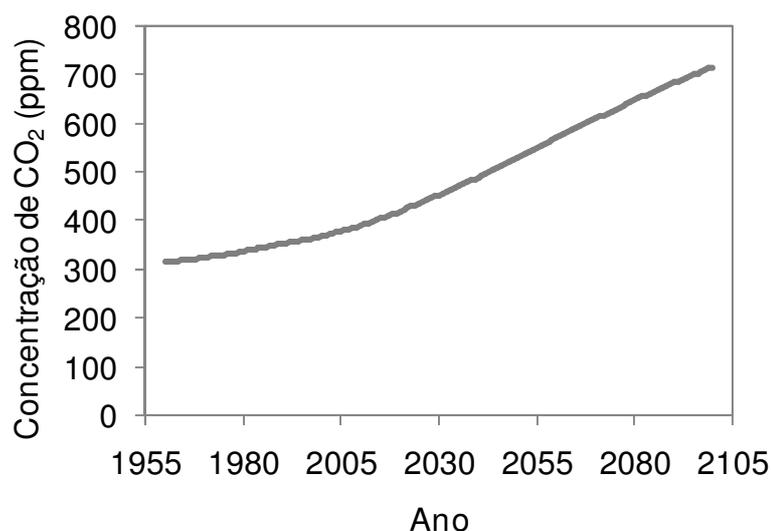


Figura 13. Evolução da concentração de CO₂ na atmosfera baseado no cenário A1B.

A concentração do CO₂ na atmosfera tem uma elevação, chegando a valores próximos de 700 ppm até o final do século XXI (Figura 13). As curvas anuais da temperatura mínima (Figura 14) e máxima (Figura 15) e da radiação solar (Figura 16) em cada região orizícola do estado mostram que há diferenças entre as regiões do estado, indicando que o cenário climático capturou as particularidades do clima de cada local. A temperatura mínima é menor nas regiões da Campanha e Depressão Central e os valores mais altos de temperatura mínima são nas regiões da Fronteira Oeste, Zona Sul e Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos. A temperatura máxima é mais elevada na Fronteira Oeste, e mais baixa na Zona Sul. Para a radiação solar, elevados níveis na Fronteira Oeste e na Zona Sul, enquanto que os menores valores são na região da Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos.

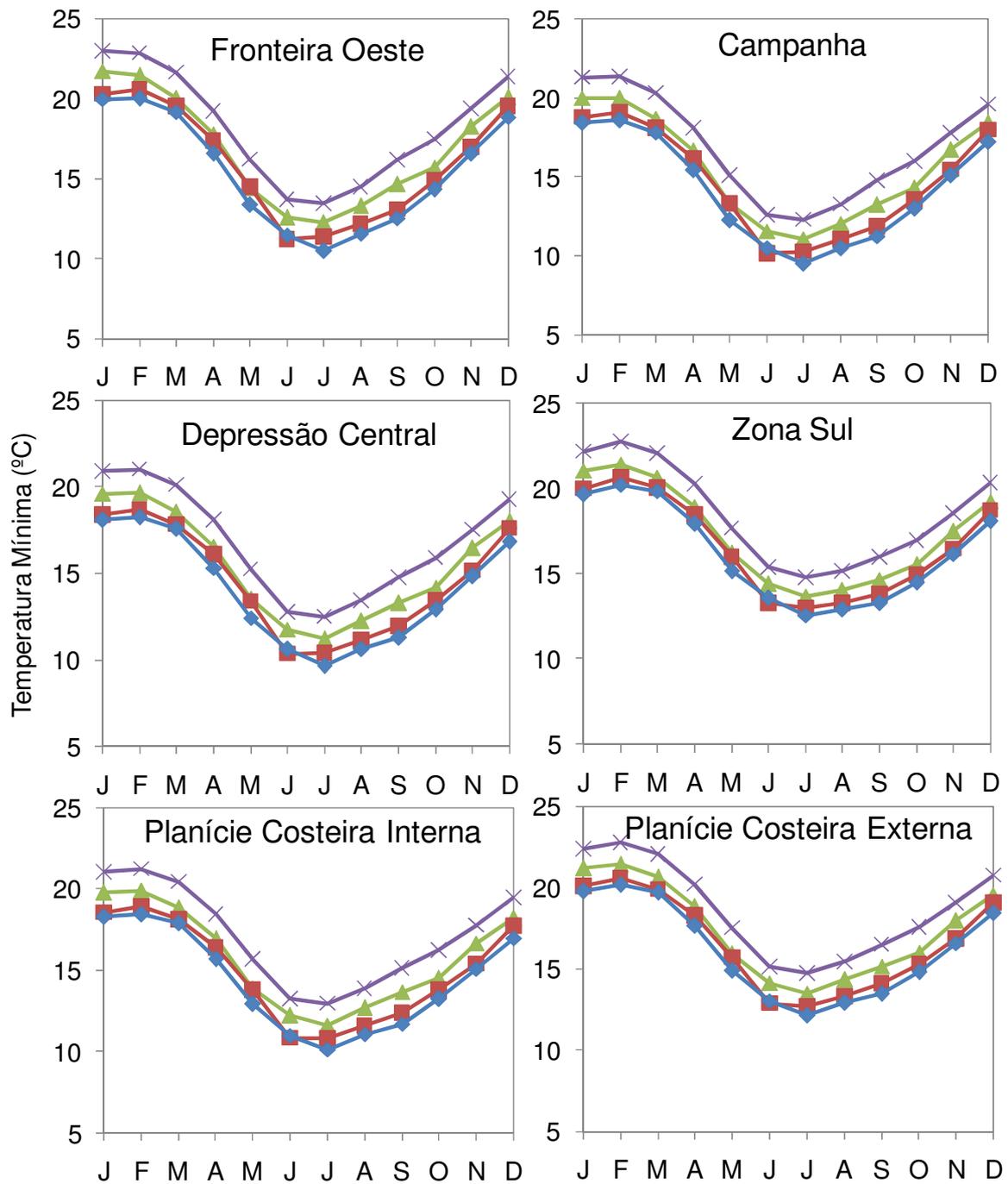


Figura 14. Curva anual da temperatura mínima do ar, nas seis regiões orizícolas do estado do RS, nos quatro períodos do cenário climático A1B.

◆ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ▲ 2030 a 2064 ✕ 2065 a 2099

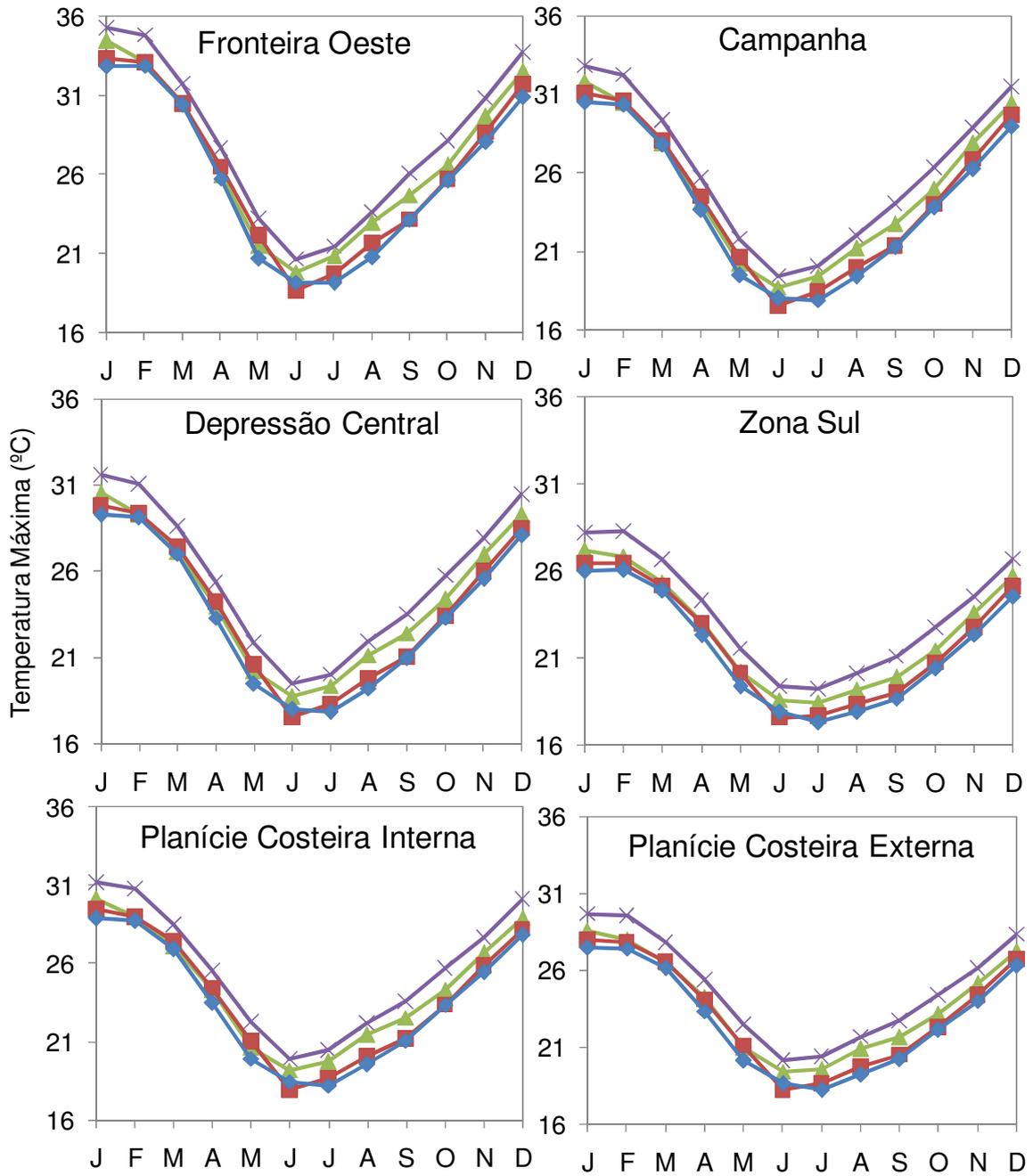


Figura 15. Curva anual da temperatura máxima do ar, nas seis regiões orizícolas do estado do RS, nos quatro períodos do cenário climático A1B.

◆ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ▲ 2030 a 2064 ✕ 2065 a 2099

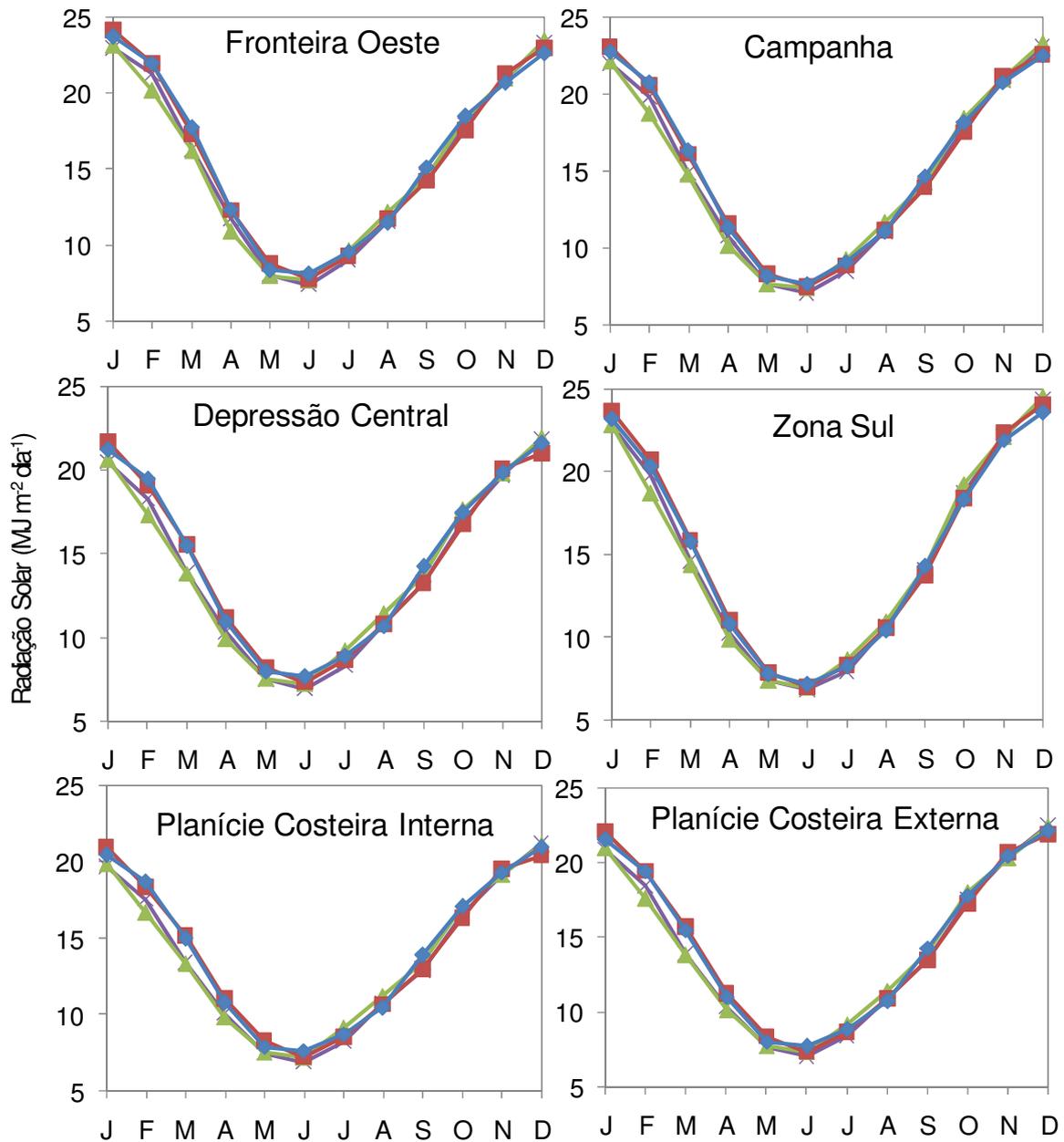


Figura 16. Curva anual da radiação solar, nas seis regiões orizícolas do estado do RS, nos quatro períodos do cenário climático A1B.

◆ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ▲ 2030 a 2064 ✕ 2065 a 2099

Em relação aos períodos de tempo apresentados nas Figuras 14 a 16, observa-se uma tendência de aumento na temperatura do ar desde 1960 até 2099, tanto na temperatura mínima quanto na temperatura máxima, para todas as regiões orizícolas do estado. A amplitude deste aumento, entre o primeiro e o último período, varia entre as regiões orizícolas, situando-se entre 2,7°C (na região da Zona Sul) e 3,7°C (na região da Fronteira Oeste) para a temperatura mínima. A temperatura

máxima apresenta aumentos de 2,4 a 2,9°C para as regiões da Zona Sul e Fronteira Oeste, respectivamente. O aumento na temperatura do ar é esperado em cenários de mudança climática, ocorrendo em consequência do aumento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, entre eles o CO₂. Quanto a radiação solar incidente, percebe-se uma pequena tendência de redução ao longo dos anos, principalmente no primeiro semestre, com uma redução mais marcante no período 2030 a 2064 no mês de fevereiro em todas as regiões. A menor disponibilidade de radiação solar nos cenários climáticos está relacionada com o aumento da nebulosidade e da tendência de aumento na precipitação na região Sudeste da America do Sul (IPCC, 2007; 2013).

A comparação entre os dados simulados e a produtividade de grãos observada, corrigida a tendência tecnológica, está representada na Figura 17.

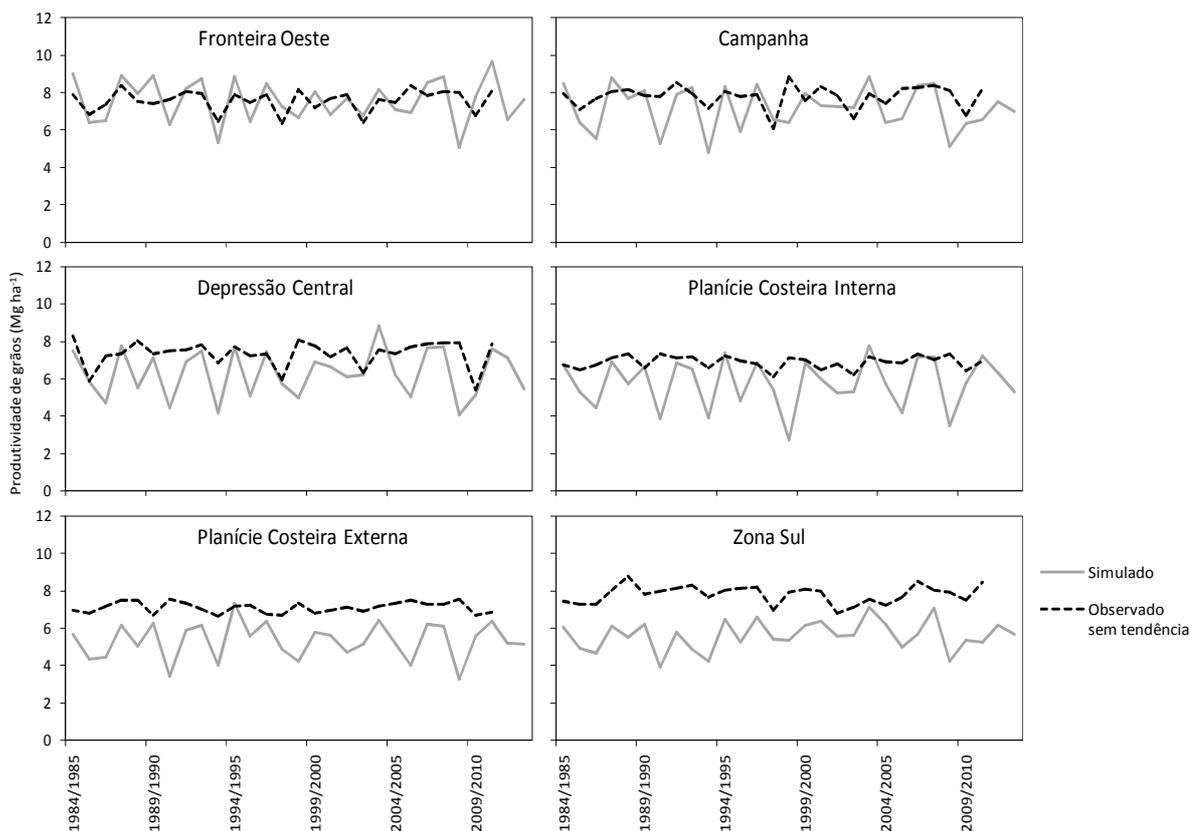


Figura 17. Produtividade simulada x observada (sem tendência tecnológica) no período 1984/85 – 2013/14 para as regiões orizícolas do estado do RS.

A análise do desempenho do modelo nas seis regiões orizícolas pelo Índice de BIAS foi a seguinte: Fronteira Oeste = 0,033; Campanha = -0,638; Depressão Central = -1,040; Planície Costeira Interna = -1,108; Planície Costeira Externa = -

1,764 e Zona Sul = -2,206. Observa-se que o modelo SimulArroz capturou a variabilidade interanual da produtividade de grãos de arroz irrigado no estado do RS, com boa aproximação dos resultados em 4 das 6 regiões orizícolas, e subestimativa considerável do modelo em duas regiões: Planície Costeira Externa e Zona Sul (Figura 17). Estas duas regiões orizícolas obtiveram os maiores incrementos de rendimento devido à tendência tecnológica (Figura 12), o que pode ter ocasionado uma superestimativa na correção da tendência, elevando demasiadamente a série observada. Apesar da distância verificada entre as séries simuladas e observadas nestas duas regiões, a RQME mostrou bom desempenho do modelo, com valores variando entre 0,83 e 1,37 Mg ha⁻¹ de dispersão entre as duas séries. Podemos considerar que o modelo teve desempenho satisfatório na maioria das regiões orizícolas do estado, com boa previsão da variabilidade entre os anos.

A média estadual da produtividade de grãos no nível tecnológico potencial, a 13% de umidade, o número de espiguetas por m², a esterilidade de espiguetas causada por frio ou por calor, e a frequência de anos com dano causado por geada para o cenário climático A1B, em sete datas de semeadura de agosto até fevereiro, no dia primeiro de cada mês, estão representados na Figura 18. De maneira geral, a produtividade de grãos de arroz irrigado foi afetada positivamente com o passar dos anos do cenário climático, principalmente no último período (2065 a 2099). A data de semeadura também teve grande influência na produtividade de grãos, sendo que semeaduras realizadas entre 1º de setembro e 1º de novembro tiveram elevadas produtividades, ficando acima de 8 Mg ha⁻¹ em todos os períodos, e ampliando a faixa para 1º de agosto nos períodos de 2030-2064 e 2065-2099, e 1º de dezembro no período de 2065-2099 (Figura 18a).

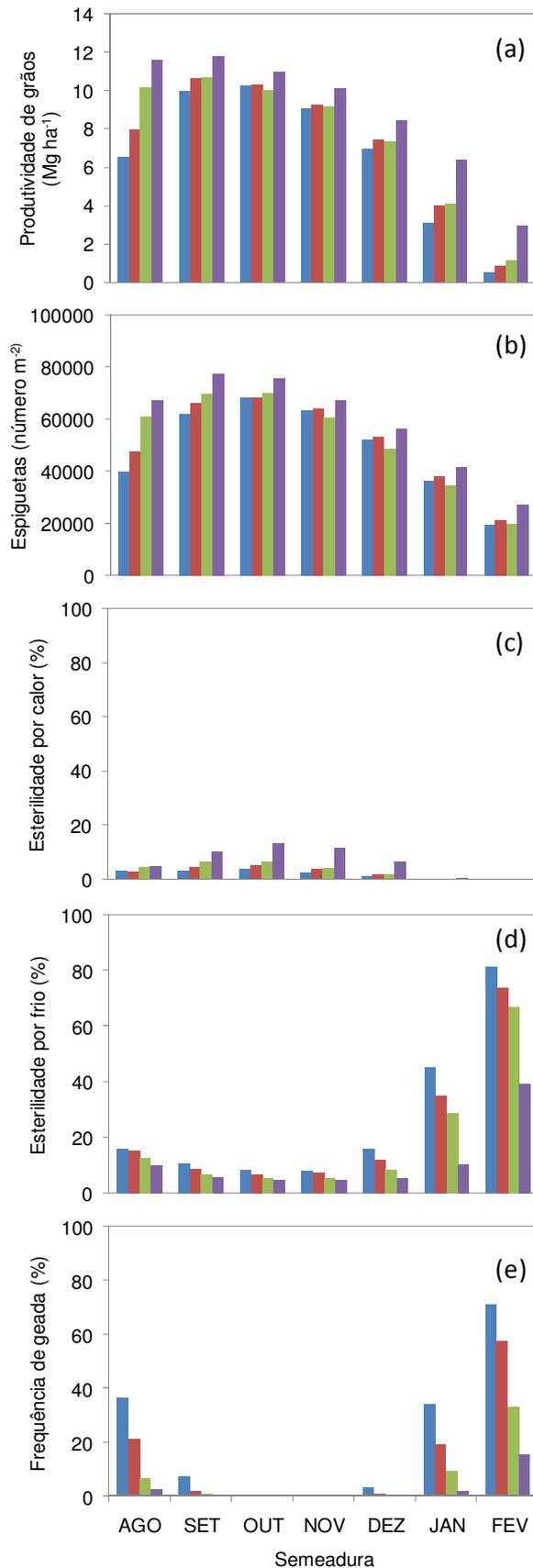


Figura 18. Produtividade potencial de arroz irrigado com umidade do grão de 13% média do Rio Grande do Sul (a), número de espiguetas produzidas (b), esterilidade de espiguetas por calor (c) e por frio (d) e frequência de anos com ocorrência de morte das plantas por geada (e) estimadas com o modelo SimulArroz em sementeiras mensais de agosto a fevereiro no cenário A1B.

■ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ■ 2030 a 2064 ■ 2065 a 2099

Para explicar a variação de produtividade deve-se analisar o número de espiguetas produzidas, que é o potencial produtivo da cultura para a quantidade de radiação solar disponível e como este potencial foi afetado pelas temperaturas muito baixas, ou muito altas (Figura 18). Nota-se que o número de espiguetas produzidas nos diferentes períodos considerados segue uma tendência de aumento gradual ao longo dos anos para as datas de semeadura de agosto a outubro, apresentando uma alteração neste padrão a partir de novembro, quando o penúltimo período climático (2030-2064) chama a atenção com baixas produtividades.

Esta variação da produtividade em meados do século XXI (período de 2030 a 2064) pode ser explicada pelas variáveis meteorológicas no cenário A1B, que apresenta redução na disponibilidade de radiação solar no mês de fevereiro no mesmo período (Figura 16). A quantidade de radiação solar disponível no período da floração define o potencial produtivo da cultura. Em semeaduras realizadas até o início de outubro, o número de espiguetas é definido antes de fevereiro, portanto a redução da radiação solar não interfere nestes casos. Porém, quando a semeadura é realizada mais tarde, o período crítico coincide com a menor disponibilidade de radiação registrada em fevereiro, afetando o número de espiguetas produzido pela cultura no período de 2030 a 2064 (Figura 18b).

A produtividade de grãos também é afetada pela temperatura do ar, através da esterilidade das espiguetas em condições de temperaturas muito baixas ou muito altas. Destas, a esterilidade de espiguetas causada pelas altas temperaturas (Figura 18c) é menos expressiva na média do estado, com valores que alcançam no máximo 13% de esterilidade das espiguetas no período mais quente do cenário A1B (ao final do século XXI).

Observa-se que a esterilidade de espiguetas causada por temperaturas baixas nas semeaduras de janeiro e fevereiro diminui quando o cenário vai em direção ao final do século XXI (Figura 18d). Esta elevada esterilidade já era esperada, uma vez que no final do verão as temperaturas estão diminuindo e à medida que a temperatura aumenta no cenário de mudança climática, a esterilidade por frio diminui, fazendo com que haja uma grande diferença na produtividade de grãos do final do século, em relação aos demais períodos. No entanto, o potencial produtivo, representado pelo número de espiguetas, é pequeno nas semeaduras de janeiro e fevereiro pela já reduzida disponibilidade de radiação solar, e a

produtividade de grãos acaba sendo muito baixa (abaixo da atual média do estado), mesmo no período com maior incremento de temperatura do ar.

Outro fator importante para a definição da produtividade da lavoura de arroz irrigado é a influência de geadas sobre a cultura. Na Figura 18e observa-se o percentual de anos em que ocorreu morte das plantas por geada nos períodos considerados. Percebe-se que os eventos de geada reduzem a média da produtividade, principalmente nas semeaduras de agosto (quando o dano acontece nas fases iniciais do desenvolvimento), janeiro e fevereiro (quando a geada prejudica a cultura em um estágio de desenvolvimento mais avançado). Quando o modelo identifica, durante o ciclo da cultura, uma condição de ocorrência de geada por um período de quatro dias consecutivos, é registrada a morte das plantas pelo dano causado, encerrando o ciclo da cultura naquela safra. Esta definição faz com que a produtividade média de grãos seja bastante reduzida nas datas de semeadura em que a ocorrência de geada é mais propícia (agosto, janeiro e fevereiro). O dano causado pela geada diminui na medida em que a temperatura do ar se eleva no futuro.

Entre as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, a produtividade de grãos foi variável. A produtividade de grãos, dada pela média entre os grupos de maturação e as datas de semeadura recomendadas para o estado, no nível tecnológico médio (que melhor representa o nível tecnológico das lavouras do estado), em cada região orizícola foi representada graficamente ao longo dos anos do cenário A1B, para verificação das tendências de produtividade. De maneira geral, a simulação da produtividade de grãos no cenário climático A1B resultou em valores crescentes ao longo da série de dados (de 1960 a 2099). A análise do coeficiente angular da equação de regressão linear entre a produtividade de grãos ao longo da série de anos do cenário indicou que, na maior parte da região orizícola do estado, a produtividade média de grãos teve tendência de aumento, destacando-se a região da zona sul com o maior incremento, e exceção de uma parte da fronteira oeste, onde houve tendência de redução da produtividade (Figura 19).

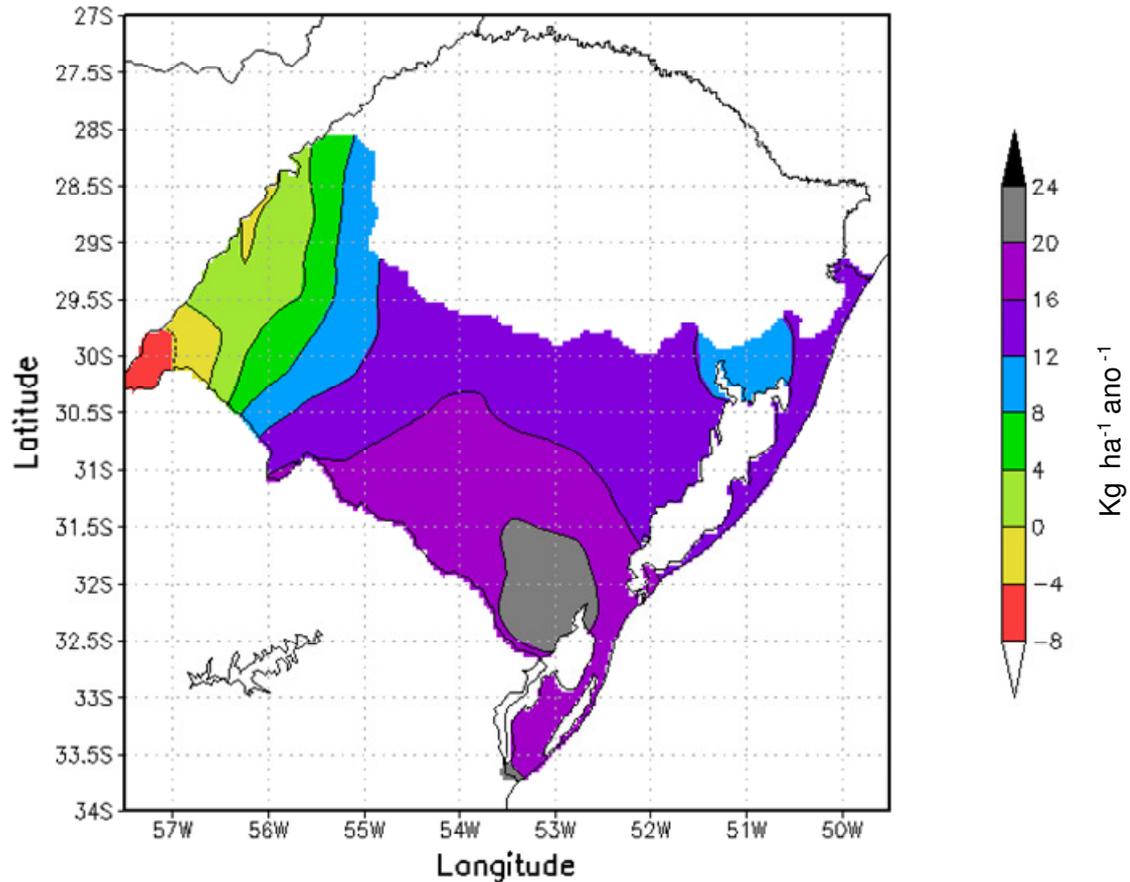


Figura 19. Mapa das tendências da produtividade de grãos de arroz irrigado no período 1960-2099, simulada com o modelo SimulArroz (nível tecnológico médio) no cenário climático A1B.

O incremento anual na produtividade de grãos variou de $3,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na média da região da Fronteira Oeste até $20,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na média para a Zona Sul do estado, sendo que as demais regiões tiveram incrementos parecidos, com valores entre $13,9$ e $15,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. As tendências observadas na região da fronteira oeste e zona sul do estado podem ser explicadas pelas variáveis meteorológicas de radiação solar e temperatura do ar. Ambas as regiões destacadas apresentam elevados índices de radiação solar, tendo portanto, alto potencial produtivo (BOUMAN et al., 2004). Atualmente, na região da fronteira oeste obtém-se elevados valores de produtividade de grãos de arroz irrigado pelas condições favoráveis, e baixos valores são observados na zona sul, devido ao alto risco de frio, que causa esterilidade de espiguetas. Com o incremento da temperatura do ar no cenário climático futuro, a zona sul do estado passa a ter uma condição mais favorável ao cultivo do arroz irrigado, com menos danos causados pelas baixas temperaturas. Enquanto que na região da fronteira oeste o aumento da temperatura

leva esta a valores prejudiciais à cultura do arroz irrigado, aumentando a esterilidade de espiguetas pelo calor.

A produtividade nas regiões em cada uma das sete datas de semeadura nos quatro períodos do cenário A1B pode ser observada nas Figuras 20 a 26. Em cada figura está representada a produtividade de grãos simulada (média dos grupos de maturação e nível tecnológico) correspondente a uma data de semeadura, que permite a observação da produtividade a cada período do cenário naquela data de semeadura. Em geral, percebe-se uma tendência de aumento da produtividade de grãos do primeiro até o último período do cenário. O aumento na produtividade de grãos ocorre em função do aumento na concentração de CO₂ ao longo dos anos no cenário climático, já que este é substrato primário no processo da fotossíntese. Além disso, o incremento da temperatura do ar ao longo do cenário climático, apesar de aumentar a esterilidade de espiguetas causada pelo calor (Figura 27), reduz os danos das baixas temperaturas nas lavouras de arroz do estado. Isto acaba aumentando a produtividade potencial de grãos, pois a esterilidade por frio (Figura 28) e as perdas por geada (Figura 29) causam mais danos hoje do que esterilidade de espiguetas por calor causará no futuro, caso o cenário climático que venha se desenhar seja semelhante ao usado neste trabalho.

Na Figura 20 estão representadas as médias da produtividade de grãos potencial com semeadura no dia 1º de agosto, em quatro períodos do cenário A1B. No período 1960-1994 (Figura 20a) observamos produtividades mais baixas (considerando que se trata do potencial produtivo da cultura), com pequenas manchas de produção mais elevada na Fronteira Oeste, Zona Sul e Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos. Avançando nos períodos do cenário percebe-se um aumento gradual das áreas com produtividade de grãos muito elevadas (acima de 8 Mg ha⁻¹), com uma tendência de aumento da produtividade em direção a Oeste do estado. Estes resultados indicam que as elevadas perdas de produtividade decorrentes de temperaturas muito baixas (esterilidade de espiguetas e geada, Figuras 28 e 29) na semeadura de agosto nos dois primeiros períodos do cenário devem diminuir significativamente até o final do século, permitindo que o período recomendado para a semeadura do arroz irrigado possa ser antecipado no estado neste cenário futuro.

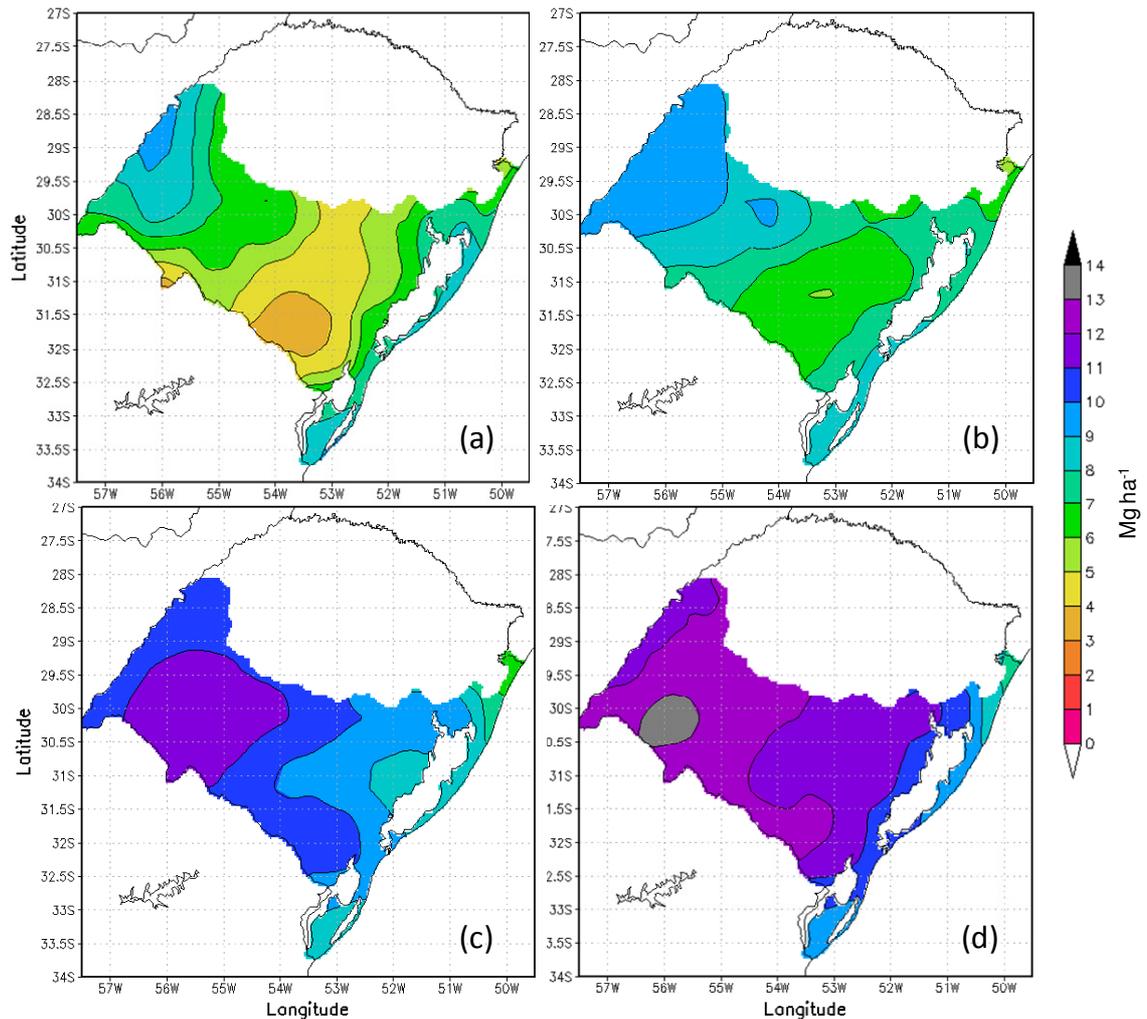


Figura 20. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1^o de agosto no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

A simulação da produtividade potencial de grãos com semeadura no mês de setembro (Figura 21) sugere que semeaduras realizadas a partir deste mês resultam em elevados índices de produtividade de grãos (acima de 8 Mg ha^{-1}) nos quatro períodos, em todas as regiões orizícolas do estado, exceto numa pequena área do extremo Leste, região da Palície Costeira Externa à Lagoa dos Patos. O mês de setembro representa o início do período atualmente recomendado para a semeadura do arroz irrigado no RS (BRASIL, 2013), apontando que as simulações tiveram boa correlação com a realidade.

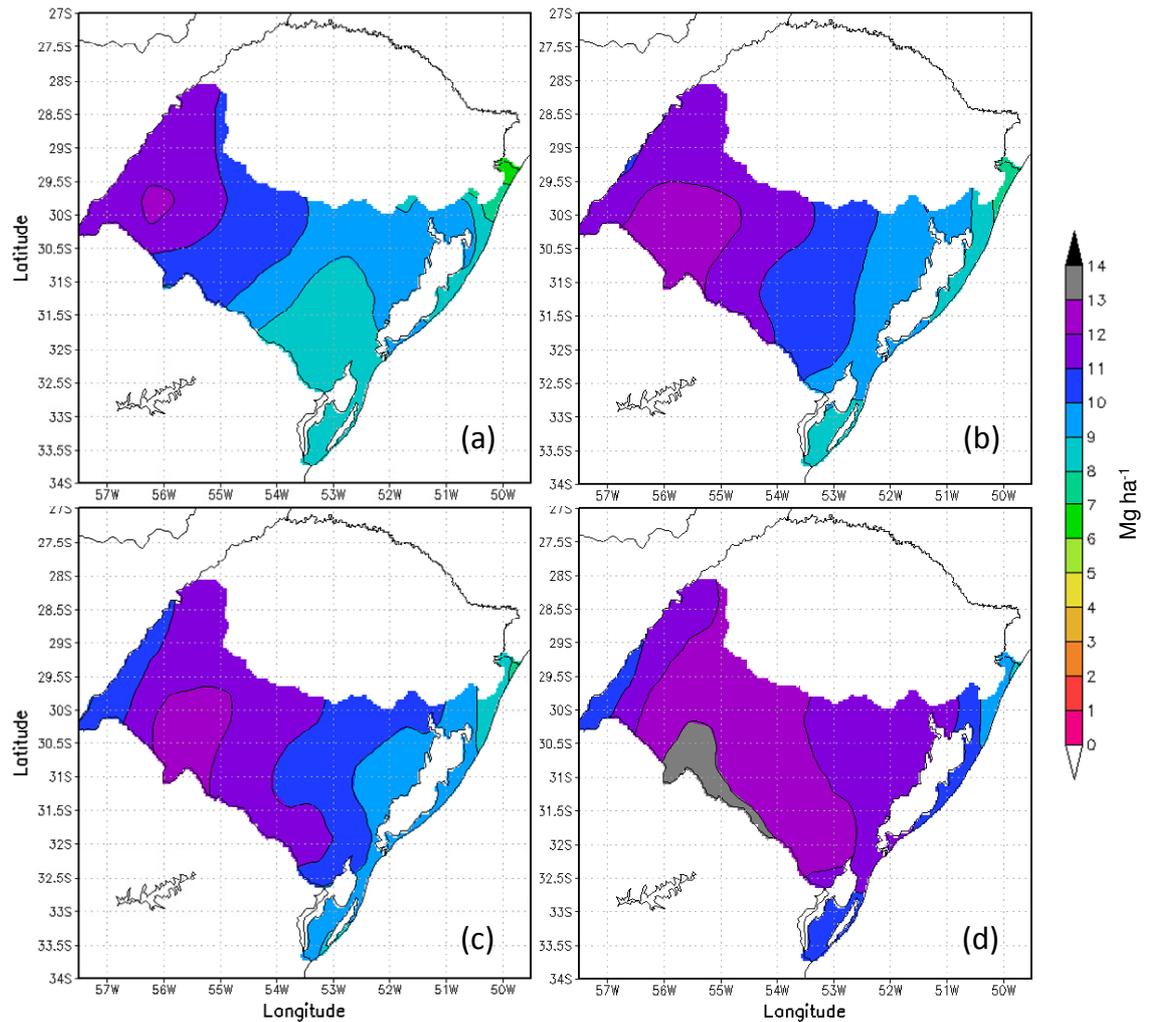


Figura 21. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de setembro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

No primeiro período representado na Figura 21, a região da Fronteira Oeste se destaca com os mais elevados níveis de produtividade de grãos, o que condiz com os dados históricos de safra registrados para o período equivalente (IRGA, 2013). Observa-se que a área com a maior produtividade de grãos se desloca da região da Fronteira Oeste, em direção à Campanha e ao centro do estado, e abrange uma maior extensão, na medida em que o tempo passa ao longo da série de anos do cenário climático avaliado. Estes resultados demonstram que as semeaduras no mês de setembro continuarão sendo recomendadas neste cenário, exprimindo altas produtividades. No entanto, a região do extremo oeste do estado poderá apresentar uma pequena redução na produtividade de grãos, pois o aumento

da temperatura do ar no final do século aumentará o dano de esterilidade de espiguetas pelo calor nesta região (Figura 27). Os valores de produtividade de grãos na semeadura de setembro (Figura 21) variaram entre 7,8 e 12,6 Mg ha⁻¹ no período atual (1995-2029) e entre 9,2 e 13,2 Mg ha⁻¹ ao final deste século (2065-2099).

A produtividade de grãos de arroz irrigado simulada para a semeadura no mês de outubro (Figura 22) foi elevada em todo o estado durante todo o cenário avaliado, permanecendo os valores entre 7,3 e 12,0 Mg ha⁻¹. No mês de novembro (Figura 23) os valores de produtividade de grãos continuaram elevados, entre 5,8 e 11,2 Mg ha⁻¹, porém abaixo do observado para setembro e outubro. Tanto para a semeadura de outubro, quanto para novembro a região da Fronteira Oeste se destaca com as maiores produtividades nos períodos 1969-1994 e 1995-2029, sendo superada a partir daí pelas demais regiões, e ao final do século os valores de produtividade de grãos são os menores quando comparados às outras regiões. No período de 2065 a 2099 a área com a mais alta produtividade se expande pelas regiões da Campanha, Depressão Central e Zona Sul. Nestes dados observa-se a menor tendência de crescimento da produtividade na Fronteira Oeste em relação às demais regiões, como já observado na análise do coeficiente angular da regressão linear do rendimento ao longo dos anos do cenário (Figura 19). A região da Fronteira Oeste atualmente já obtém elevadas produtividades para o arroz irrigado, podendo estar produzindo próximo ao seu potencial produtivo, por isso tem menos potencial de crescimento nos cenários futuros, mesmo com aumento da concentração de CO₂. Além disso, o aumento da temperatura do ar previsto no cenário A1B teve efeito mais expressivo na região da Fronteira Oeste, onde os incrementos de temperatura do ar ocasionaram maior esterilidade de espiguetas por calor (Figura 27), comprometendo a produtividade de grãos. Os dados meteorológicos do cenário climático, apresentados nas Figuras 14 e 15, expõem os elevados valores de temperatura do ar na região da Fronteira Oeste, com altas temperaturas mínimas e máximas. Esta característica explica a pronunciada esterilidade de espiguetas por calor nesta região, especialmente nos períodos do cenário climático em que a temperatura é mais elevada.

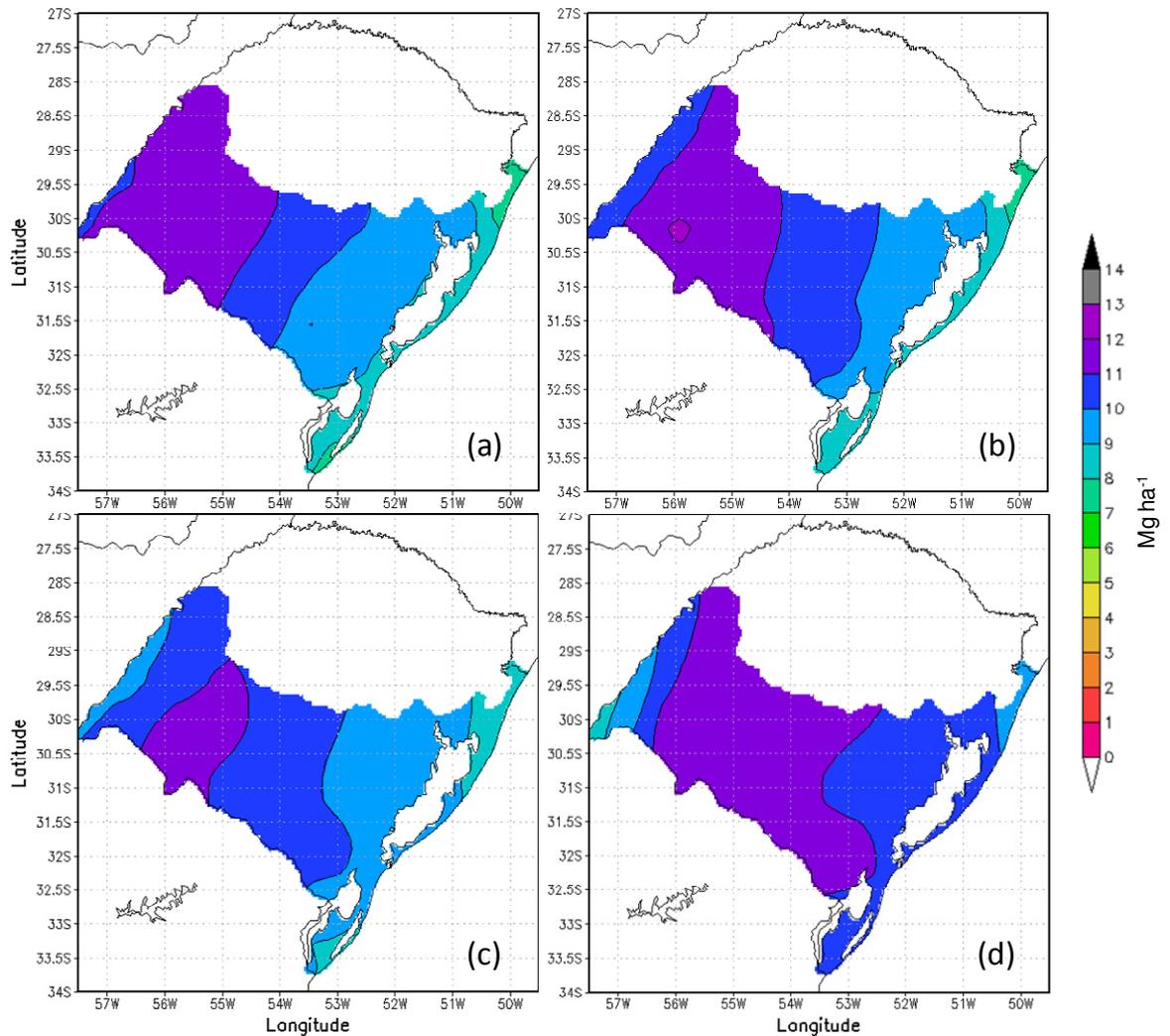


Figura 22. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de outubro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

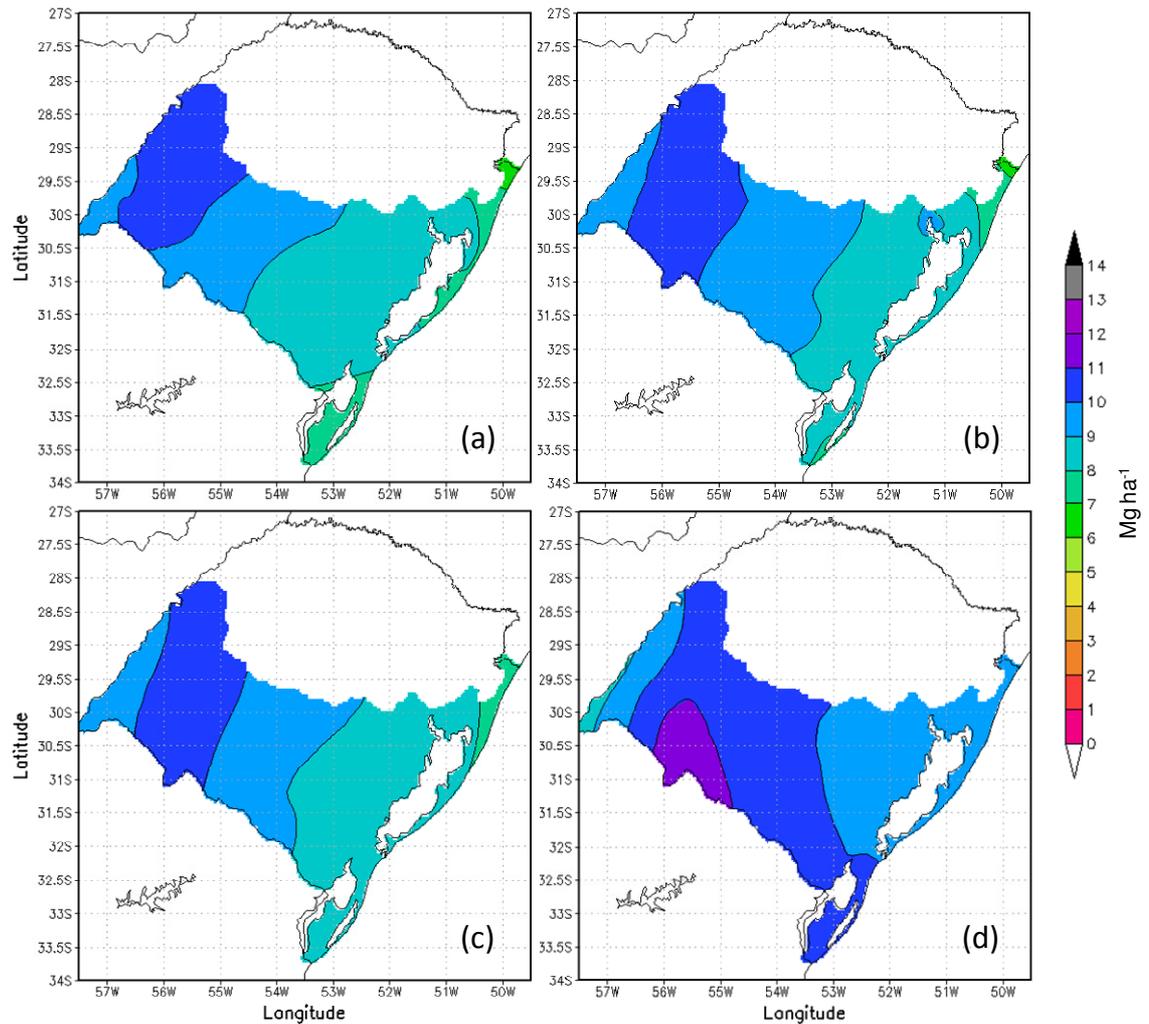


Figura 23. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de novembro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

A simulação da semeadura no mês de dezembro (Figura 24) mostrou que a partir desta data a produtividade potencial de grãos diminui muito em todas as regiões orizícolas do estado. Os valores situam-se entre 3,9 e 9,2 Mg ha⁻¹, com os maiores valores para a Fronteira Oeste, e menores produtividades variando entre as Planícies Costeiras (Interna e Externa à Lagoa dos Patos) e Depressão Central, de acordo com o período considerado.

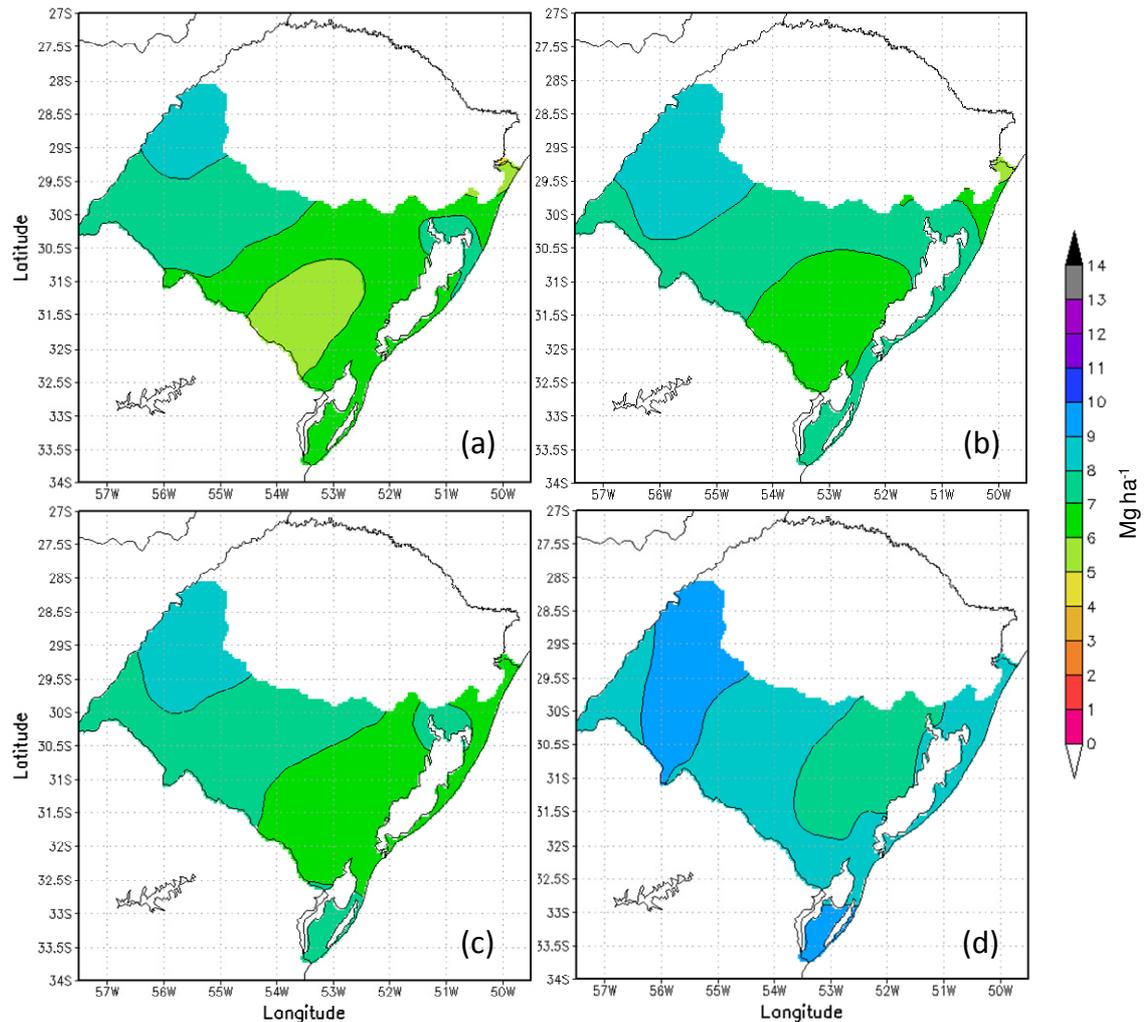


Figura 24. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de dezembro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

As simulações com semeadura em janeiro (Figura 25) e fevereiro (Figura 26) resultaram nos menores valores de produtividade de grãos. Nestas datas de semeadura muitos anos tiveram produtividade igual a zero, principalmente nos primeiros anos do cenário climático, quando a esterilidade de espiguetas por frio (Figura 28) e a frequência de anos com morte das plantas por geada (Figura 29) causaram danos severos, com valores médios próximos a 100% de perda, o que contribuiu para diminuir a média de produtividade. As semeaduras nos meses de janeiro e fevereiro não são atualmente recomendadas para o arroz irrigado no RS (BRASIL, 2013), pois semeadura nesses meses resulta em que o estágio de desenvolvimento de maior sensibilidade das plantas às baixas temperaturas (antese)

ocorrerá em um momento em que as temperaturas já estão ficando mais baixas, prejudiciais ao bom desenvolvimento da cultura.

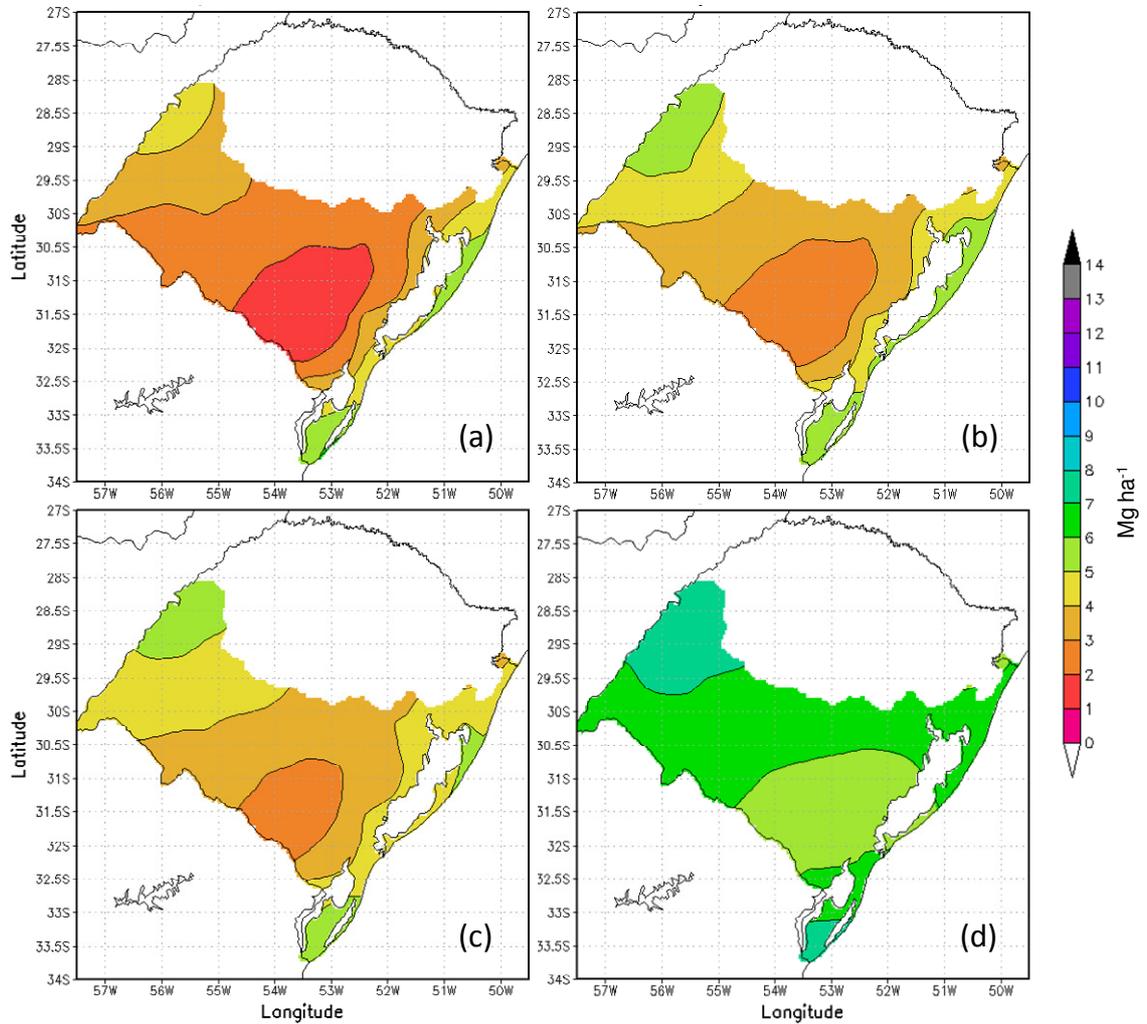


Figura 25. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de janeiro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

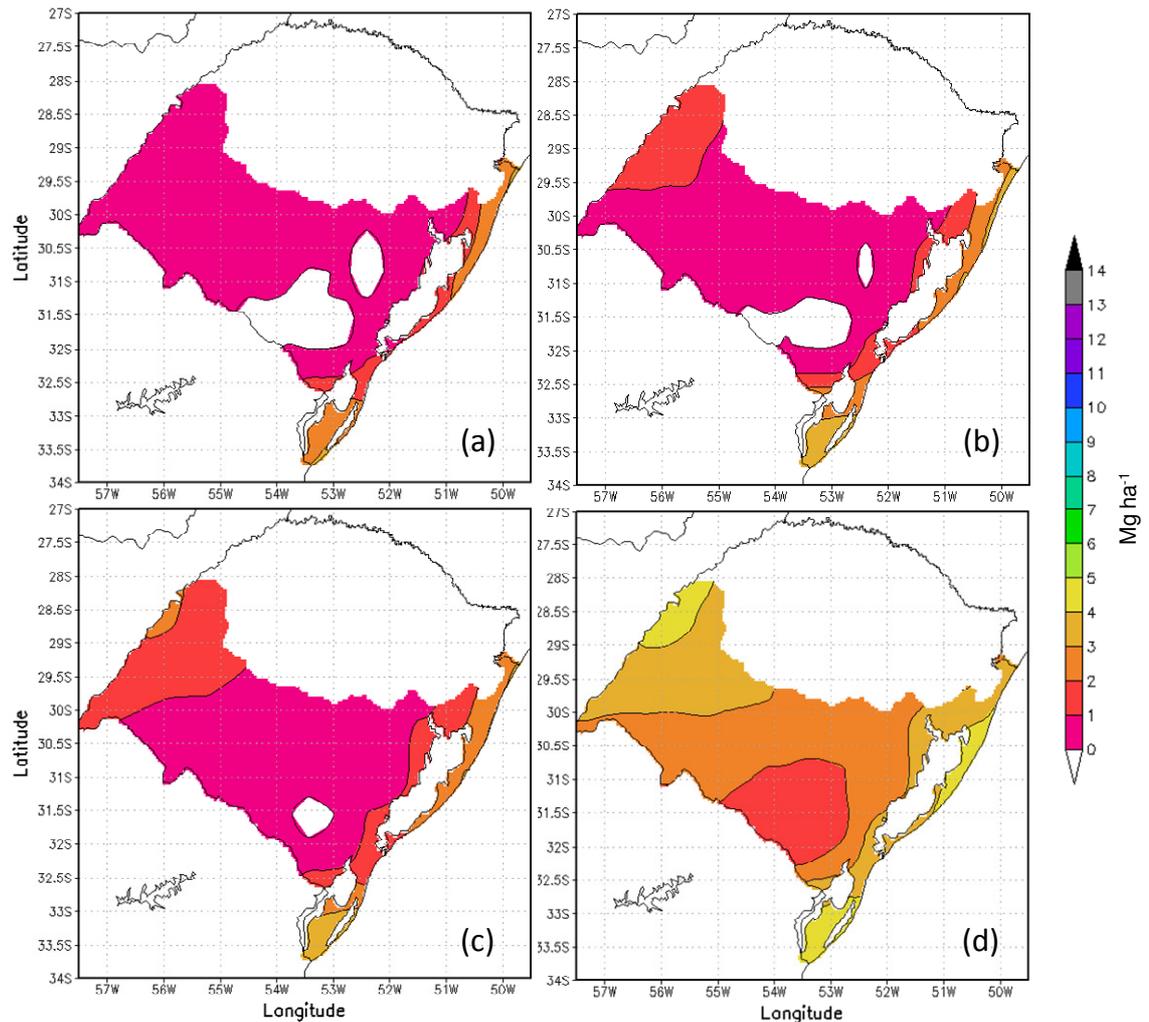


Figura 26. Produtividade de grãos* de arroz irrigado com semeadura no dia 1º de fevereiro no estado do Rio Grande do Sul, nos períodos 1960-1994 (a), 1995-2029 (b), 2030-2064 (c) e 2065-2099 (d) do cenário climático A1B.

*Valores referentes ao potencial produtivo da cultura, com 13% de umidade do grão.

Períodos: passado (1960 a 1994), atual (1995 a 2029), meados do século XXI (2030 a 2064) e final do século XXI (2065 a 2099).

A partir de janeiro a radiação solar disponível no estado do RS sofre um decréscimo (Figura 16), sendo assim, a cultura parte de um potencial produtivo mais baixo se for semeada tardiamente, visto que a disponibilidade de radiação solar é que define o número total de espiguetas produzidas (BOUMAN et al., 2004). Com a redução da radiação solar, por consequência, a temperatura do ar também diminui, e mesmo no cenário futuro, quando as temperaturas serão mais elevadas, percebe-se a grande esterilidade de espiguetas e danos por geada nas semeaduras de janeiro e fevereiro (Figuras 28 e 29).

Com o incremento de temperatura no último período do cenário climático (2065 a 2099), percebe-se que a produtividade de grãos foi mais elevada nas

semeaduras de janeiro e fevereiro (Figuras 25 e 26). No entanto, os valores em torno de 5 a 6 Mg ha⁻¹ em janeiro e um máximo de 4,2 Mg ha⁻¹ em fevereiro, são baixos em se tratando de produtividade potencial de grãos de arroz irrigado para o estado do RS.

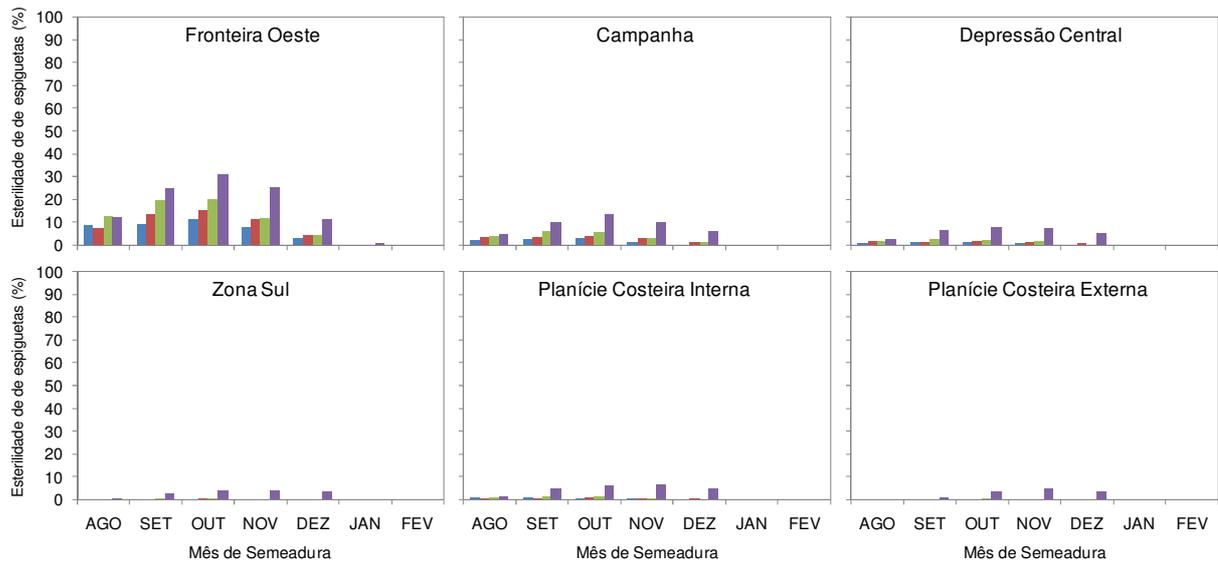


Figura 27. Esterilidade de espiguetas (%) causada por temperaturas elevadas em diferentes datas de semeadura e períodos do cenário A1B, nas regiões orizícolas do estado do RS.

Períodos: ■ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ■ 2030 a 2064 ■ 2065 a 2099
Semeaduras realizadas no dia 1° de cada mês.

A zona sul mostrou o maior incremento de produtividade, com tendência de aumento de aproximadamente 20 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 19). Essa região se caracteriza pelo elevado risco de frio (MOTA et al., 1999; STEINMETZ et al., 2003) devido as baixas temperaturas mínimas absolutas, fazendo com que, atualmente, esta região apresente uma variabilidade com relação à produtividade de grãos ao longo dos anos. Com a temperatura do ar mais elevada no cenário de mudança climática utilizado neste trabalho, o risco de frio diminui e as temperaturas tendem a ficar mais próximas da temperatura ótima para o crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz irrigado. Este fato, associado à boa disponibilidade de radiação solar da Zona Sul do estado (MOTA, 1995), fazem com que esta região tenha um potencial de crescimento produtivo para o arroz irrigado no cenário A1B.

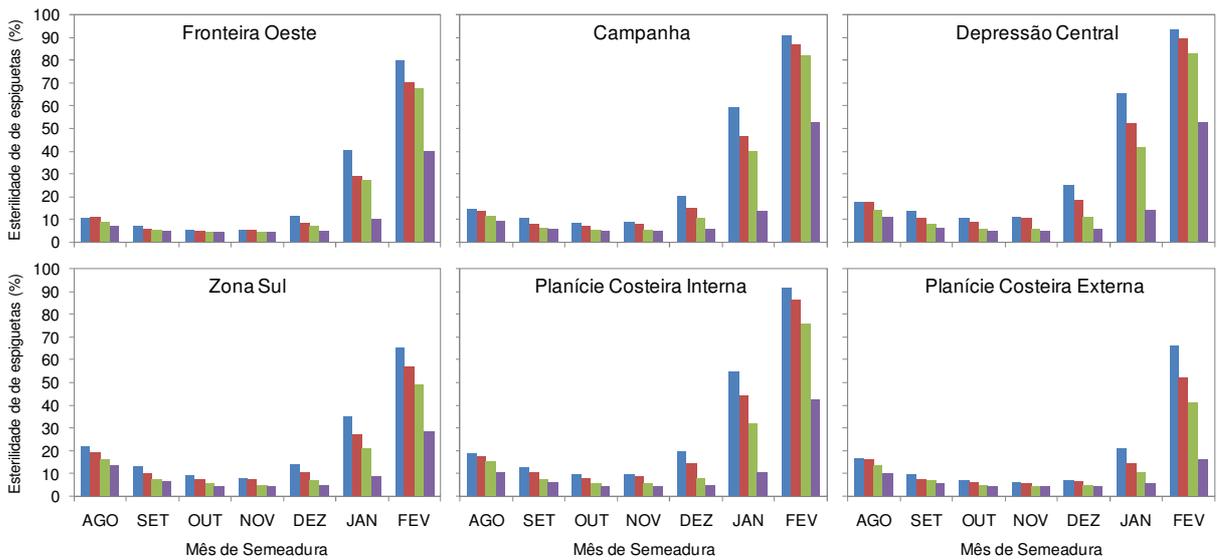


Figura 28. Esterilidade de espiguetas (%) causada por temperaturas baixas em diferentes datas de semeadura e períodos do cenário A1B, nas regiões orizícolas do estado do RS.

Períodos: ■ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ■ 2030 a 2064 ■ 2065 a 2099
Semeaduras realizadas no dia 1^o de cada mes.

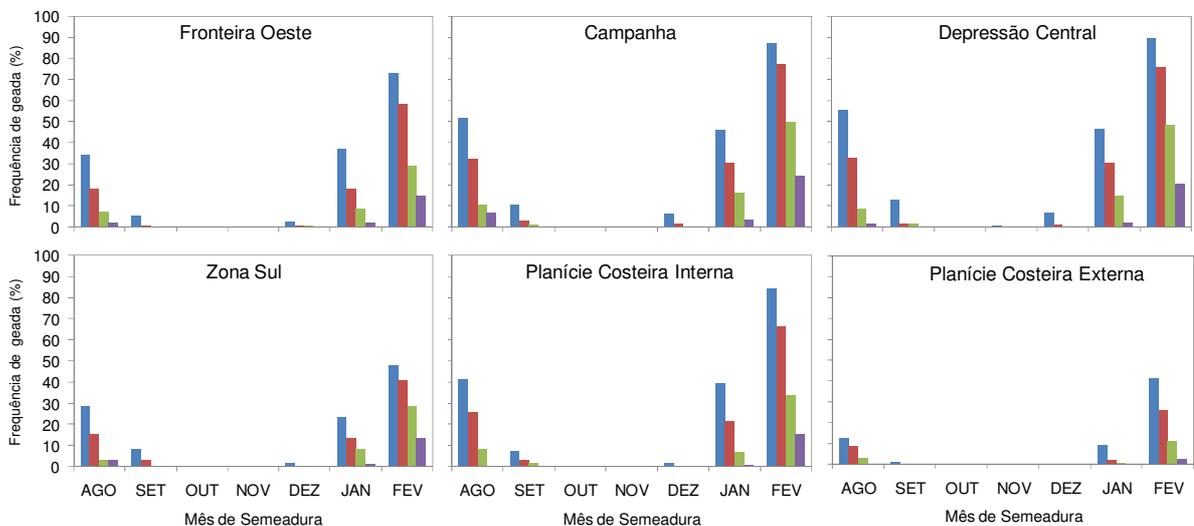


Figura 29. Frequência de anos com ocorrência de danos causados por geada em diferentes datas de semeadura e períodos do cenário A1B, nas regiões orizícolas do estado do RS.

Períodos: ■ 1960 a 1994 ■ 1995 a 2029 ■ 2030 a 2064 ■ 2065 a 2099
Semeaduras realizadas no dia 1^o de cada mes.

Na Figura 30 está representada a produtividade de grãos de arroz irrigado no estado do RS no período atual de um cenário climático projetado pelo IPCC, considerando diferentes ciclos de maturação: precoce, médio e tardio. Os valores de produtividade de grãos observados nos mapas referem-se à média no período

recomendado para a semeadura no estado e nível tecnológico médio. Os mapas representam a produtividade no período correspondente ao clima “Atual” (1995 a 2029). A produtividade de grãos, de maneira geral, é maior para cultivares de ciclo médio, variando de acordo com a região do estado. A região Oeste e Campanha tem os maiores valores de produtividade de grãos de arroz irrigado no cenário atual, esta produtividade diminui em direção ao Leste do estado. Na Figura 31 encontram-se os valores da anomalia da produtividade de grãos do cenário futuro em relação ao cenário atual. Percebe-se que quanto mais longo é o ciclo de desenvolvimento, menor será a variação da produtividade no cenário futuro, pois os valores da anomalia na maior parte do estado situam-se mais próximos de zero. As regiões sul e leste apresentam os maiores incrementos produtivos, e a região oeste do estado tem anomalias negativas para a produtividade de grãos de arroz irrigado no cenário climático A1B, em função do aumento da esterilidade de espiguetas.

A produtividade de grãos de arroz irrigado em diferentes níveis tecnológicos está na Figura 32. Os valores de produtividade de grãos correspondem à média dos três grupos de maturação de cultivares no período recomendado para a semeadura no estado, no clima atual. Observa-se um incremento na produtividade de grãos de arroz irrigado conforme o nível tecnológico da lavoura varia de baixo para alto. Este resultado era previsto, uma vez que a diferença entre os níveis tecnológicos refere-se à maior ou menor influência de fatores bióticos (pragas, doenças e plantas invasoras) e abióticos (água e adubação) sobre a produtividade potencial. A produtividade de grãos apresenta anomalia negativa no extremo oeste (Figura 33), a qual se expande em direção ao centro do estado nos níveis tecnológicos mais altos. No restante do estado a anomalia da produtividade de grãos no cenário futuro foi positiva, mostrando um incremento do clima Atual para o clima Futuro (Figura 33).

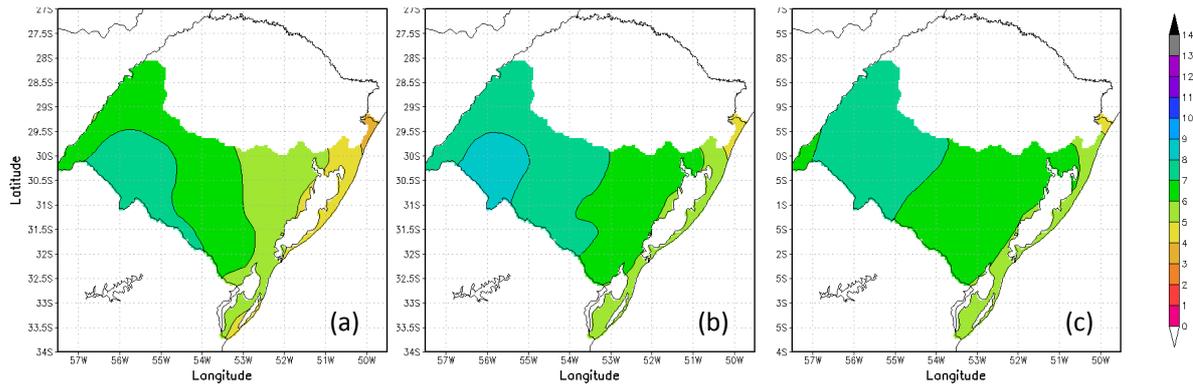


Figura 30. Produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) de arroz irrigado para o estado do RS, no cenário climático A1B, período atual (1995-2029), em diferentes grupos de maturação: precoce (a), médio (b) e tardio (c).

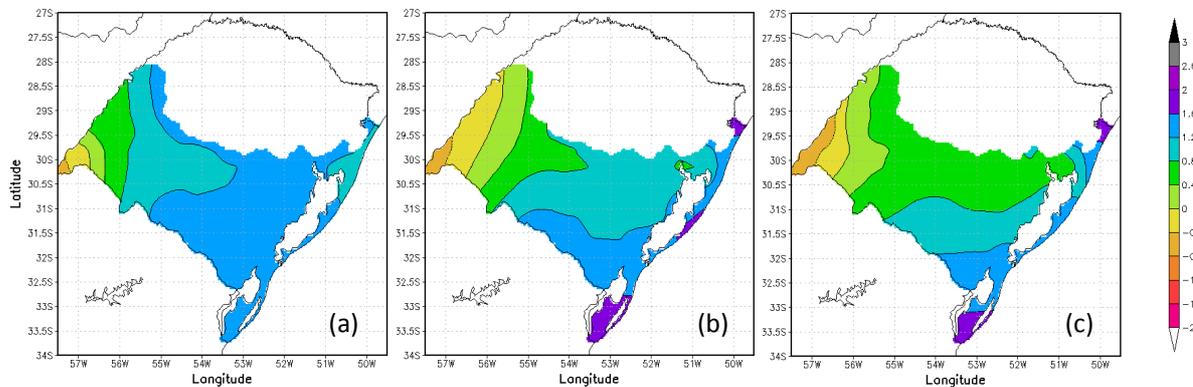


Figura 31. Anomalia na produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) de arroz irrigado para o estado do RS, do período de clima futuro (2065-2099) em relação ao atual (1995-2029), em diferentes grupos de maturação: precoce (a), médio (b) e tardio (c), cenário climático A1B.

Estes resultados devem levar em consideração o fato de que novas cultivares e tecnologias poderão ser desenvolvidas, permitindo alterações no potencial produtivo da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Outros estudos semelhantes, porém em diferentes locais do planeta tem mostrado resultados similares, como no Japão, onde Iizumi et al. (2011) encontraram aumento do rendimento de grãos de arroz em uma região do país (26,9%) e redução de -0,8% em outra região, que foi explicada pelo aumento dos dias com temperatura elevada, aumentando a esterilidade de espiguetas. Na Índia, Kumar et al. (2014) verificaram uma tendência de redução da produtividade de aproximadamente 2% com 1º de elevação na temperatura, enquanto Krishnan et al. (2007) encontraram um incremento de mais de 56% em um estudo de simulação com o modelo InfoCrop no leste da Índia.

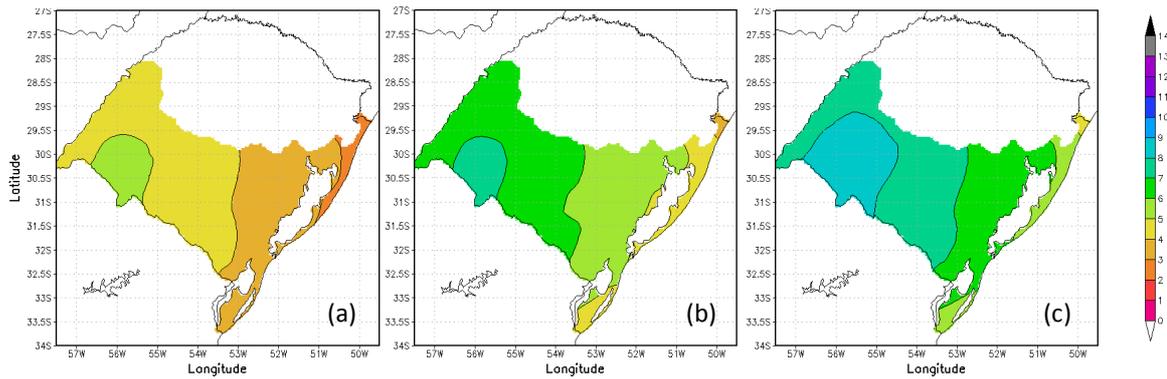


Figura 32. Produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) de arroz irrigado para o estado do RS, no cenário climático A1B, período atual (1995-2029), em diferentes níveis tecnológicos da lavoura: baixo (a), médio (b) e alto (c).

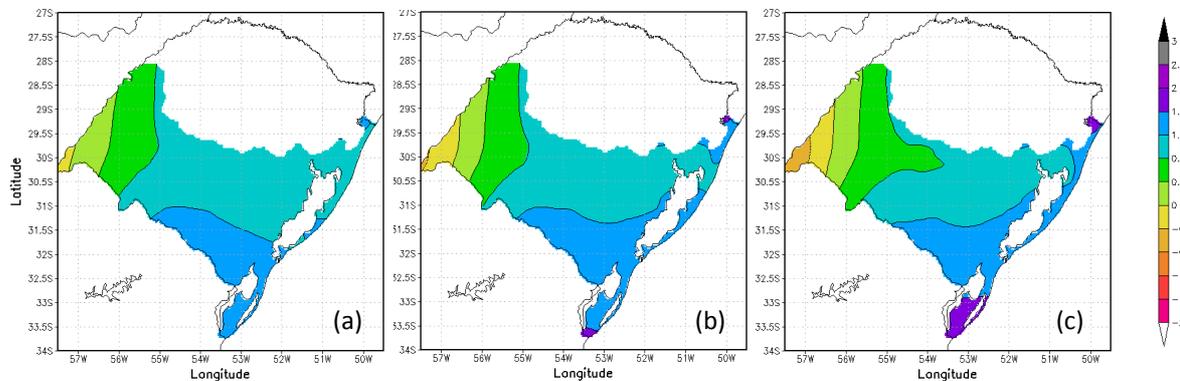


Figura 33. Anomalia na produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) de arroz irrigado para o estado do RS, do período de clima futuro (2065-2099) em relação ao atual (1995-2029), em diferentes níveis tecnológicos da lavoura: baixo (a), médio (b) e alto (c), cenário climático A1B.

Neste estudo foi utilizado um modelo dinâmico da cultura do arroz (SimulArroz) acoplado a saídas de modelos climáticos dinâmicos (global e regional), o que aumenta a segurança na descrição da complexa interação dos agroecossistemas com o ambiente. Os modelos agrícolas tem uma limitação geral que é a dependência de parâmetros genéticos, os quais podem mudar a medida que novas cultivares são lançadas no mercado. Além disso, os modelos agrícolas tem dificuldade em capturar mudanças de manejo nas lavouras que possam vir a acontecer no futuro. O SimulArroz tem estas limitações também, inclusive com relação a dinâmica do nitrogênio, pois com o aumento do crescimento em elevado CO_2 , a demanda por nitrogênio na planta aumenta, o que pode implicar que, para se manter a produtividade elevada, necessita-se maior quantidade de adubação nitrogenada nas lavouras de arroz. Mas mesmo com estas limitações, os modelos

agrícolas são ferramentas que podem auxiliar a entender melhor a dinâmica e a complexidade dos agroecossistemas frente a possíveis mudanças no clima regional.

CONCLUSÕES

O modelo SimulArroz capturou as diferenças de produtividade de grãos de arroz irrigado nas seis regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul, mostrando a influência do cenário climático A1B.

A produtividade de grãos de arroz irrigado aumentou no cenário avaliado, especialmente no final do século XXI, quando os danos causados por temperaturas baixas e geadas são amenizados pelo aumento da temperatura do ar.

Com a mudança climática prevista no cenário A1B o período favorável para a semeadura poderá ser antecipado, com início em agosto.

Dentre as regiões orizícolas do estado, na Fronteira Oeste há menor tendência de aumento da produtividade, enquanto que a região da Zona Sul do estado apresenta maior propensão de alcançar produtividades mais elevadas no futuro.

Há diferenças na produtividade de grãos dos grupos de maturação de arroz irrigado e dos diferentes níveis tecnológicos da lavoura, sendo as cultivares do grupo médio mais produtivas que as demais e as cultivares precoces mais propensas a incrementos de produtividade.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P. K. et al. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 89, p. 1-25, 2006.

AGGARWAL, P. K.; MALL, R. K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. **Climatic Change**, Netherlands, v. 52, p. 331-343, 2002.

AÍMOLA, L. A. L.; DIAS, P. L. da S. A incerteza científica e a opinião pública na balança das negociações sobre mudança de clima. In: **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**. Desafios Associados às Mudanças Climáticas. Vol.31, n. 1, abril 2007.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A.; NELSON, R.; LONG, S. P. Testing the “source-sink” hypothesis of down-regulation of photosynthesis in elevated [CO₂] in the field with single gene substitutions in *Glycine max*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 85-94, 2004. doi:10.1016/j.agrformet.2003.09.002, disponível em: www.sciencedirect.com.

ANDRESEN, J. A.; ALAGARSWAMY, G.; ROTZ, C. A.; RITCHIE, J. T.; LEBARON, A. W. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1059-1070, 2001.

ANGHINONI, I. et al. **Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. IRGA – Estação Experimental de solos e águas. Cachoeirinha, 2004. 52p.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

BAE, H.; SICHER, R. Changes of soluble protein expression and leaf metabolite levels in *Arabidopsis thaliana* grown in elevated atmospheric carbon dioxide. **Field Crops Research**, v. 90, n. 61-73, 2004. doi:10.1016/j.fcr.2004.07.005, disponível em: www.sciencedirect.com.

BOUMAN, B. A. M. et al. **ORYZA 2000**: modeling lowland rice. Version 2.12, November, 2004. In: Cereal Knowledge Bank, International Rice Research Institute. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/default.htm>>. Acesso em: 20 maio 2010.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretário de Política Agrícola. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul, anosafra 2013/2014**. PORTARIA Nº 267, DE 5 DE DEZEMBRO DE 2013.

CALIMAN, F. R. B. **Enriquecimento com CO₂ por meio de compostagem para a cultura do tomateiro em ambiente protegido**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 79 f., 2008.

CAMARGO, E. R. et al. Influência da aplicação de nitrogênio e fungicida no estágio de emborrachamento sobre o desempenho agrônômico do arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 153-159, 2008a.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A.; BERGONCI, J. I. Relação entre elementos meteorológicos e rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, p. 289-294, 2002.

CASSMAN, K. G. et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environmental Resources**, v. 28, p. 315-358, 2003.

COUNCE, P.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.

CHEN, G. Y.; YONG, Z. H.; LIAO, Y.; ZHANG, D. Y.; CHEN, Y.; ZHANG, H. B.; CHEN, J.; ZHU, J. G.; XU, D. Q. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both ribulose-1,5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1,5-bisphosphate regeneration limitation. **Plant Cell Physiology**, v. 46, n. 7, p. 1036-1045, 2005. doi:10.1093/pcp/pci113, disponível em: www.pcp.oupjournals.org

CONFALONIERI, R. et al. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 220, p. 1395-1410, 2009.

DELUCIA, E. H.; SASEK, T.W.; STRAIN, B.R. Photosynthetic inhibition after long-term exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide. **Photosynthesis Research**, v.7, n.1, p.75-184, 1985.

ESTEFANEL, V. et al. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS: I. Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. **Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa arroz e feijão, 2003.1ed. 250 p.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, v. 65, p. 116-119, 1973.

HULME, M.; ZHAO, Z. C.; JIANG, T. Recent and future climate change in East Asia. **International Journal of Climatology**, New York, v. 14, n. 4, p. 637-658, 1994.

IIZUMI, T.; YOKOZAWA, M.; NISHIMORI, M. Probabilistic evaluation of climate change impacts on paddy rice productivity in Japan. **Climatic Change**, v. 107, p. 391-415, 2011. DOI 10.1007/s10584-010-9990-7.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, **Summary for Policymakers**. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University, 2013. 33p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.

Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro, v. 26, n. 11, p. 1-80, nov. 2013.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA. **Dados de Safras**. Porto Alegre, 2013. Disponível em: < <http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/4215/safras>>. Acesso em: 20 out. 2013.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA. **Publicações**. Apresentação CENSO 2005. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20060524160029.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2008.

KERR, R. A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, v. 307, p. 828-829, 2005.

KIM, H. Y.; LIM, S. S.; KWAK, J. H.; LEE, D. S.; LEE, S. M.; RO, H. M.; CHOI, W. J. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂. Springer. **Plant soil**. v. 342. p. 59-71, 2011.

KINIRY, J. R. et al. Rice Parameters Describing Crop Performance of Four U.S. Cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1354-1361, 2001.

KRISHNAN, P.; SWAIN, B.; CHANDRA BHASKAR, B.; NAYAK, S. K.; DASH, R. N. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 122, p.233-242, 2007.

KROPFF, M. J.; Van LAAR, H. H.; MATTHEWS, R. B. ORYZA1: an ecophysiological model for irrigated rice production. In: **SARP Research Proceedings**. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI, 1994. 110 p.

KUMAR, A.; SHARMA, P.; AMBRAMMAL, S. K. Climatic Effects on Food Grain Productivity in India: A Crop Wise Analysis. **Journal of Studies in Dynamics and Change**, v. 1, n. 1, p. 38-48, 2014.

LAGO, I. et al. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red Rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1441-1448, 2008.

LARROSA, R. M.; MARCHESAN, E.; SILVA, L. S. da; AVILA, L. A.de. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na suscetibilidade do arroz à temperatura baixa na fase reprodutiva. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p. 992-997, 2009.

LUZZARDI, R.; SARAIVA, C. T.; BOCK, F.; WEBER, L.; PASQUALLI, L. Avaliação preliminar da produtividade em campo e qualidade industrial de híbridos de arroz no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. v. 1, p. 70-72.

MAHLMAN, J. D. Uncertainties in projections of human induced climate warmings. **Science**, Washington, v. 278, n. 5342, p. 1416-1417, 1997.

MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas**, Agronômica Ceres LTDA. São Paulo. 1980.

MATSUI, T. et al. Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 51, n. 3, p. 213-219, 1997.

MATTHEWS, R. B. et al. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. **Agricultural Systems**. v. 54, n. 3, p. 399-425, 1997.

MENEZES, V. G.; MACEDO, V. R. M.; ANGHINONI, I. **Projeto 10**: estratégias de manejo para o aumento da produtividade, competitividade e sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS. 2004.

MONTEITH, J. L.; SCOTT, R. K. Weather and yield variation of crops. In: BLAXTER, K.; FOWDEN, L. **Food, nutrition and climate**. Englewood Cliffs: Applied science, 1982. p. 127-149.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; van VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, 2010.

MOTA, F. S. da. Disponibilidade de radiação solar e risco de frio no período reprodutivo do arroz irrigado em diferentes regiões do Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, v. 48, n. 424, 1995.

MOTA, F. S.; ROSSKOFF, J. L. C.; SILVA, J. B. Probabilidade de ocorrência de dias com temperaturas iguais ou superiores a 35°C no florescimento do arroz no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 147-149, 1999.

NOBRE, C.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21. In: **Parcerias Estratégicas**. Edição Especial – Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: Ministério da Ciência e Tecnologia, Número 27, dezembro/2008.

OLDEMAN, L. R. et al. Response of rice to weather variables. In: **International workshop on the impact of weather parameters on growth and yield of rice**. Los Baños: IRRI, 1986. p. 5-39.

ROSA, H. T. **Simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul com o modelo SimulArroz**. 2013. 96p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: The biological environment**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 495 p.

SHIMONO, H.; SUZUKI, K.; AOKI, K.; HASEGAWA, T. e OKADA M. Effect of panicle removal on photosynthetic acclimation under elevated CO₂ in rice. **Photosynthetica**, v. 48, n. 4, p. 530-536, 2010.

SIÉ, M.; DINGKUHN, M.; WOPEREIS, M. C. S.; MIEZAN, K. M. Rice crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment. I. Development of an empirically based model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 57, n. 1, p. 1- 13, 1998.

SINGH, U.; RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C. **A Users Guide to CERES Rice v 2.10.:** simulation manual. Muscle Shoals, AL, USA: International Fertilizer Development Center, 1993. 131 p.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 115-129, 1994.

SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M. F.; COSTA, A. C.; WOZNIAK, M. A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. EMBRAPA: Jaguariúna, SP, 2001. p. 33-63.

SOLTANI, A. et al. Simulating GFDL Predicted Climate Change Impacts on Rice Cropping in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 3, p. 81-90, 2001.

SOMBROEK, W. G.; GOMES, R. The climate change-Agriculture conundrum. In: BAZZAZ, F.; SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John Wiley & Sons, 1996. Cap. 1, p. 1-14.

SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Gravatal, SC: SOSBAI, 2012. 177p.

STAPPER, M.; HARRIS, H. C. Assessing de productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 129-152, 1989.

STEINMETZ, S. et al. Mapeamento das probabilidades de ocorrência de temperatura mínimas do ar, durante o período reprodutivo do arroz irrigado, no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 169-179, 2003.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.45-74.

STEINMETZ, S.; ALMEIDA, I. R. **Caracterização e mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul**. EMBRAPA Clima Temperado, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 175, Pelotas, 2012. 24p.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 424-433, 2006a.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre a produtividade de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. , v. 41, p. 1351 - 1359, 2006b.

STRECK N. A.; BOSCO, L. C.; LAGO, I. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 490-501, 2008.

STRECK, N. A. et al. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. **Transactions of the ASABE**, v. 54, p. 371-384, 2011.

STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; SILVA, M. R. da; UHLMANN, L. O. CO₂-response function of radiation use efficiency in rice for climate change scenarios. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 7, p. 879-885, 2012.

STRECK, N. A.; CHARÃO, A. S.; WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; BENEDETTI, R. P.; MARCHESAN, E.; SILVA, M. R. SimulArroz: Um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. *In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO*, 2013, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2013a. p. 1618-1627.

STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; GABRIEL, L. F. Leaf development of cultivated rice and weedy red rice under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 190-199, 2013b.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artemed, 2009. 848p.

THOMAS, A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 102, n. 2-3, p. 71-81, 2000.

TUBIELLO, F. N.; DANATELLI, M.; ROSENZWEIG; STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 179-189, 2000.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA, Foreign Agricultural Service. **Production, Supply and Distribution Online**: Custom Query. USDA, 2013. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 21 out. 2013.

WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. A. Simulação da produtividade de grãos de arroz irrigado em cenários de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1237-1245, nov. 2010.

WALTER, L. C. et al. Adaptação e avaliação do modelo InfoCrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 510-521, 2012.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, v. 58, p. 119-147, 2003.

YANG, L.; HUANG, J.; YANG, H.; DONG, G.; LIU, G.; ZHU, J.; WANG, Y. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, v. 98, p.12-19, 2006. doi:10.1016/j.fcr.2005.11.003, disponível em: www.elsevier.com/locate/fcr.

YELLE, S.; BEESON JR, C. R.; TRUDEL, M. J.; GOSSELIN, A. Acclimation of two tomato species to high atmospheric CO₂ – I sugar and starch concentrations. **Plant Physiology**, v. 90, p. 1465-1472, 1989.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of Rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981, 269p.

YOSHIDA, S.; PARAO, F. T. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. In: IRRI (ed.). **Climate & rice**. Los Baños, 1976. p. 471-494.

ZISKA, L. H.; BUNCE, J. A. Sensitivity of field-grown soybean to future atmospheric CO₂: selection for improved productivity in the 21st century. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 27, p. 979-984, 2000. doi: 10.1071/PP00043 0310-7841/00/100979